



CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE EQUIPOS PARA EL PROCESADO DE HORTALIZAS EN V GAMA

Fernando Jiménez Muro

PROYECTO FIN DE CARRERA

Julio 2011

Director: Jorge Mir
Ponente: Jose Ángel Peña
Departamento de IQTMA

Centro Politécnico Superior
Ingeniería Química
Curso académico 10/11

RESUMEN

Caracterización térmica de equipos para el procesamiento de hortalizas en V Gama

El procesamiento de hortalizas en V Gama conlleva la aplicación de un tratamiento térmico suave (entre 65 °C y 90 °C) seguido de un enfriamiento rápido, para prolongar su vida útil en refrigeración y mantener una alta calidad organoléptica.

La eficacia térmica de los equipos utilizados en el procesamiento condiciona la elección de la combinación tiempo-temperatura más adecuada para conseguir el grado de pasteurización deseado, minimizando la degradación del producto.

Para cuantificar esta dependencia, se determinaron los coeficientes térmicos de diferentes equipos utilizados en la industria alimentaria: un cocedero de camisa de agua, un horno mixto convectivo de restauración, un túnel de enfriamiento por aire y un baño de agua y hielo. Dicha determinación se llevó a cabo a partir de perfiles experimentales de temperatura.

Los coeficientes térmicos y los perfiles experimentales de temperatura se incorporaron posteriormente a un modelo matemático, implementado con un programa de elementos finitos (COMSOL Multiphysics 3.4), que permitió optimizar el valor de dichos coeficientes y simular un ciclo completo de calentamiento-enfriamiento para el producto, proporcionando también, tras incorporar los parámetros de termodestrucción correspondientes,

- el tiempo de calentamiento necesario para obtener una correcta pasteurización: una reducción de 7 unidades logarítmicas en la población de *Listeria Monocytogenes*, un microorganismo patógeno presente en hortalizas,
- el tiempo de enfriamiento necesario para alcanzar la temperatura de almacenamiento (4 °C) y
- la inactivación de la enzima *polifenoloxidas*a (PPO), responsable del pardeamiento enzimático en frutas y hortalizas.

El modelo se validó con pencas de acelga (*Beta vulgaris* var. Cicla) envasadas al vacío, determinándose experimentalmente los perfiles de temperatura y la actividad final de la enzima PPO a fin de encontrar el tratamiento óptimo.

Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a todos los compañeros y colegas con los que he coincidido a lo largo de los años, tanto en el CPS como en la Facultad de Veterinaria, y en especial a Jorge y a mi madre, por su infinita paciencia.

Índice general

Agradecimientos	III
Índice general	V
Memoria	
1.Introducción	1
1.1 Objetivos y alcance del proyecto.....	1
1.2 Tareas desarrolladas.....	2
1.3 Antecedentes.....	2
2.Materiales y métodos	5
2.1 Equipos para el procesado de alimentos de V Gama.....	5
2.2 Caracterización térmica de equipos.....	7
2.3 Modelado matemático, simulación y optimización.....	10
2.4 Caracterización y seguimiento de los parámetros de calidad del producto.....	13
2.4.1 Extracción de la PPO.....	13
2.4.2 Medida de la actividad de la PPO.....	14
2.4.3 Termorresistencia de la PPO.....	14
2.5 Procesado de pencas de acelga en V Gama.....	15
3.Resultados y discusión	17
3.1 Caracterización térmica de equipos.....	17
3.1.1 Cuerpo esférico.....	17
3.1.1.1 Horno mixto convectivo.....	17
3.1.1.2 Cocedero.....	20
3.1.1.3 Túnel de enfriamiento por aire.....	21
3.1.1.4 Baño de hielo.....	22
3.1.2 Cuerpo paralelepipedico.....	22
3.1.2.1 Horno mixto convectivo.....	22
3.1.2.2 Cocedero.....	25
3.1.2.3 Túnel de enfriamiento por aire.....	26

3.2 Validación y optimización de coeficientes térmicos.....	27
3.2.1 Cuerpo esférico.....	27
3.2.2 Cuerpo paralelepipedico.....	30
3.3 Procesado de pencas de acelga como alimento de V Gama.....	34
3.3.1 Caracterización de la PPO.....	34
3.3.2 Tratamientos térmicos.....	34
4.Conclusiones y trabajos futuros	39
Bibliografía	41
Índice de figuras	45
Índice de tablas	49
 Anexos	
A.Determinación de coeficientes térmicos	57
A.1 Estudios previos con los equipos.....	58
A.1.1 Horno mixto convectivo.....	58
A.1.2 Cocedero.....	61
A.1.3 Túnel de enfriamiento por aire.....	62
A.2 Metodología.....	65
A.2.1 Cuerpo esférico.....	65
A.2.1.1 Horno mixto convectivo.....	67
A.2.1.2 Cocedero.....	68
A.2.1.3 Túnel de enfriamiento por aire.....	69
A.2.1.4 Baño de hielo.....	70
A.2.2 Cuerpo paralelepipedico.....	70
A.2.2.1 Horno mixto convectivo.....	74
A.2.2.2 Cocedero.....	76
A.2.2.3 Túnel de enfriamiento por aire.....	78
A.3 Tablas de resultados.....	79
A.4 Bibliografía.....	85
 B.Tecnología de los Alimentos aplicada a su conservación	87
B.1 Tratamientos térmicos para la conservación de alimentos.....	87
B.1.1 Distintos tipos de tratamientos térmicos.....	88
B.1.2 Cinética de la destrucción térmica de los microorganismos.....	89
B.1.3 Tiempo de reducción decimal.....	90
B.1.4 Termorresistencia.....	91
B.1.5 Degradación térmica de los alimentos.....	91
B.2 Listeria Monocytogenes.....	92
B.2.1 Patogenia, síndromes clínicos y tratamiento.....	92
B.2.2 Medios de crecimiento y transmisión.....	93
B.3 PPO (polifenoloxidasas).....	95
B.4 Otros parámetros.....	96
B.5 Bibliografía.....	97

C.Simulación	99
C.1 Métodos numéricos.....	99
C.1.1 Dinámica de flúidos computacional (DFC).....	100
C.1.2 Propiedades de los métodos numéricos.....	101
C.1.2.1 Consistencia.....	101
C.1.2.2. Estabilidad.....	101
C.1.2.3 Convergencia.....	101
C.1.2.4 Conservación.....	102
C.1.2.5 Valor acotado.....	102
C.1.2.6 Realizabilidad.....	102
C.1.2.7 Exactitud.....	103
C.1.3 Métodos de discretización y tipos de malla.....	104
C.1.3.1 Diferencias finitas (DF).....	104
C.1.3.2 Volúmenes finitos (VF).....	105
C.1.3.3 Elementos finitos (EF).....	105
C.1.4 COMSOL Multiphysics: simulación multifísica con ayuda de elementos finitos.....	107
C.1.4.1 Características de la versión COMSOL Multiphysics 3.4 y requisitos del sistema.....	108
C.2 Simulaciones.....	110
C.2.1 Validación y optimización de coeficientes.....	110
C.2.1.1 Dibujo de la geometría.....	110
C.2.1.2 Configuración de los dominios geométricos.....	111
C.2.1.3 Condiciones de contorno.....	112
C.2.1.4 Definición de constantes y expresiones.....	112
C.2.1.5 Mallado.....	113
C.2.1.6 Resolución del modelo.....	114
C.2.1.7 Postprocesado y análisis de los resultados.....	115
C.2.1.8 Scripts.....	116
C.2.1.8.1 Geles.....	121
C.2.1.8.2 Esfera.....	129
C.2.1.9 Tablas de resultados.....	134
C.2.2 Reducción de la población de Listeria Monocytogenes.....	140
C.2.2.1 Configuración de los dominios geométricos.....	140
C.2.2.2 Condiciones de contorno.....	141
C.2.2.3 Definición de constantes y expresiones.....	141
C.2.2.4 Mallado.....	142
C.2.2.5 Resolución del modelo.....	142
C.2.2.6 Postprocesado y análisis de los resultados.....	143
C.2.3 Desactivación térmica de la PPO (Polifenoloxidasas).....	143
C.2.3.1 Configuración de los dominios geométricos.....	144
C.2.3.2 Condiciones de contorno.....	144
C.2.3.3 Definición de constantes y expresiones.....	145
C.2.3.4 Resolución del modelo.....	145
C.2.3.5 Postprocesado y análisis de los resultados.....	145
C.3 Bibliografía.....	146
D.Acelgas	147
D.1 Caracterización de la PPO (polifenoloxidasas).....	147
D.1.1 Metodología.....	148

D.1.1.1 Extracción de la PPO.....	148
D.1.1.2 Medida de la actividad de la PPO.....	148
D.1.1.3 Termorresistencia de la PPO.....	148
D.1.2 Cinética enzimática. Ecuación de Michaelis-Menten.....	149
D.1.2.1 Resultados.....	152
D.1.3 Termorresistencia.....	153
D.2 Procesado de pencas de acelga como alimento de V Gama.....	155
D.2.1 Procesado y tratamiento.....	156
D.2.1.1 Cortado.....	156
D.2.1.2 Desinfección.....	156
D.2.1.3 Lavado.....	156
D.2.1.4 Acondicionamiento.....	157
D.2.1.5 Envasado al vacío.....	157
D.2.1.6 Tratamiento térmico.....	157
D.2.1.7 Amacenamiento.....	160
D.2.1.8 Resultados.....	160
D.2.2 Simulaciones.....	163
D.2.2.1 Tratamientos térmicos reales.....	163
D.2.2.2 Tratamientos térmicos recomendados.....	166
D.3 Bibliografía.....	168

Memoria

Capítulo 1

Introducción

El presente Proyecto Fin de Carrera, que lleva por título “Caracterización térmica de equipos para el procesado de hortalizas en V gama”, ha sido desarrollado en la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza, concretamente dentro del Grupo de Investigación en Alimentos de Origen Vegetal del Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos; complementa, a partir de datos obtenidos experimentalmente en equipos existentes en dicho departamento, trabajos previos sobre el control de parámetros en el procesado térmico de alimentos (Mir, 2004; Mir et al., 2008^a, 2008^b; Alcusón et al., 2008) y puede servir de base para trabajos posteriores que utilicen los citados equipos.

1.1 Objetivos y alcance del proyecto

Este proyecto ha consistido en la cuantificación de los coeficientes térmicos convectivos de distintos equipos que pueden ser utilizados en una línea de procesado de alimentos de V gama, a escala de laboratorio/restauración (un horno mixto convectivo, un cocedero de pasta y vegetales, un túnel de enfriamiento por aire y un baño de hielos).

Una vez conocidos dichos coeficientes y con ayuda de la simulación numérica y la microbiología predictiva, se obtuvieron los tiempos de calentamiento/enfriamiento necesarios, bajo distintas condiciones de operación de los equipos, que proporcionaban un producto alimentario simulado seguro en el plano microbiológico y satisfactorio en el plano organoléptico.

Por último, se validaron y optimizaron los distintos datos obtenidos en las etapas anteriores con ayuda de la simulación numérica y de pencas de acelga (*Beta vulgaris* var. *Cicla*) envasadas al vacío, sometidas a diversos tratamientos térmicos reales.

1.2 Tareas desarrolladas

Para caracterizar térmicamente los equipos se registró la evolución temporal de la temperatura en dos cuerpos geométricos (un cuerpo esférico y un cuerpo paralelepípedo), situados en el interior de cada unidad, bajo diversas condiciones de operación; previamente se había comprobado la reproducibilidad de los experimentos en cada uno de los equipos así como la uniformidad de temperaturas en el interior de los mismos. Tras el tratamiento matemático de los datos registrados, de acuerdo a ecuaciones de conducción de calor transitoria con condiciones de contorno convectivas, se obtuvieron los diversos coeficientes de calentamiento/enfriamiento que caracterizan a los equipos bajo estudio. Parte de estas tareas se detallan en el Anexo A.

Se buscaron y recopilaron las necesidades térmicas para pasteurizar un producto vegetal de V gama, determinando la letalidad mínima sobre la población microbiana existente. Como microorganismo clave para este tipo de procesos se eligió la *Listeria monocytogenes* como referencia; a su presencia en gran número de vegetales hay que sumar el riesgo de contaminación en el procesamiento de dichos alimentos hasta llegar al consumidor y su carácter patógeno (Brackett, 1999). También se profundizó en el estudio de otro parámetro de calidad importante en este tipo de alimentos, la actividad enzimática, en este caso, de la *polifenoloxidasa* (PPO), principal responsable del pardeamiento enzimático en vegetales tales como acelga, borraja... (Aydemir, 2004; Mir et al., 2006). Se realizaron experimentos para caracterizar la termorresistencia de dicho enzima, así como medidas de su actividad en pencas de acelga antes y después de los tratamientos térmicos correspondientes. También se realizaron experimentos para conocer las constantes cinéticas de la ecuación de Michaelis-Menten para el caso que nos ocupa, el de la PPO, las cuales describen la velocidad de las reacciones en las que se encuentra involucrada dicha enzima. Estas tareas se detallan en los Anexos B y D.

Con ayuda del entorno de simulación COMSOL Multiphysics 3.4, los coeficientes obtenidos anteriormente así como los datos de termorresistencia de la *Listeria monocytogenes* y de la PPO, se incorporaron a varios modelos termoquímicos que permitieron estudiar la evolución térmica de un producto alimentario ‘tipo’ de V gama y el seguimiento de los dos parámetros de calidad del mismo, anteriormente citados. La programación de rutinas que complementaban a la simulación, en el lenguaje de secuencia de comandos COMSOL Script 1.2, permitió el ajuste y optimización de los modelos citados y de los valores de los diversos coeficientes. Parte de estas tareas se detallan en el Anexo C.

Por último, se realizó el procesamiento completo de un alimento de V gama (cortado, desinfección, lavado, acondicionamiento, envasado, tratamiento térmico - calentamiento y enfriamiento- y almacenamiento), pencas de acelga, y se comprobó la bondad de los modelos anteriormente desarrollados. Estas tareas se detallan en el Anexo D.

1.3 Antecedentes

Desde hace algunos años han proliferado en el mercado distintos tipos de alimentos preparados, envasados y casi listos para su consumo, destinados a ahorrar

tiempo en la cocina. Tras la aparición de estos alimentos y en un intento por clasificarlos junto con los alimentos tradicionales, se han establecido en la práctica cinco gamas. El principal criterio de clasificación ha sido el tipo de procesado característico del alimento. Aunque hay casos concretos difíciles de catalogar, las definiciones más extendidas serían las siguientes:

- I gama. Productos frescos y productos conservados por métodos tradicionales (deshidratación, salazón, fermentación...).
- II gama. Incluye los alimentos conservados mediante la aplicación de tratamientos térmicos que buscan una alta esterilidad aun a costa de la calidad organoléptica del producto (conservas tradicionales).
- III gama. Alimentos conservados mediante la aplicación de frío (congelados y refrigerados).
- IV gama. Productos frescos de alta calidad, lavados, pelados, cortados y envasados para aumentar su vida útil. En este grupo se incluyen todos los productos envasados en atmósfera modificada, listos para su consumo.
- V gama. Platos preparados o semipreparados, sometidos a un tratamiento térmico suave (TTS), de calidad intermedia entre los productos frescos y las conservas tradicionales y comercializados, normalmente, refrigerados.

La demanda de alimentos vegetales que conjuguen frescura, garantía de seguridad alimentaria y comodidad para su elaboración culinaria es creciente, tanto por parte del consumidor final como por los sectores de restauración y catering. Las propuestas de nuevos productos rozan los límites de los conocidos como fresco-cortados; a estos productos se les denomina V gama y responden a lo que esperan los consumidores y los industriales en búsqueda de productos de uso cómodo y rápido pero seguros en el plano microbiológico y satisfactorios en el plano organoléptico (Mir et al., 2008^a). Se trata de productos vegetales a los que, habiendo sufrido un TTS (con temperaturas comprendidas entre los 60 y 90 °C), se les garantiza una duración de conservación en frío de hasta 6 semanas (a 2 °C ± 2 °C según la intensidad del tratamiento aplicado) lo que sitúa a estos productos entre el ámbito de las conservas tradicionales y de los frescos (la Fig.1.1 muestra estas tendencias); dichos productos presentan, además, mejores características sensoriales y nutricionales que las citadas conservas (Creed, 1995; Schellekens, 1996).

Es el calentamiento, junto con el enfriamiento y refrigeración posteriores, lo que produce el impacto más acusado en la calidad del producto ya que las combinaciones tiempo-temperatura necesarias para alcanzar el grado de pasteurización deseado, generan perfiles térmicos que afectan a ciertos parámetros; por tanto, es muy importante la caracterización de equipos y etapas térmicas de dicho tipo de procesado. Entre los citados parámetros de calidad se encuentran parámetros físicos, bioquímicos, microbiológicos...

Un parámetro bioquímico a seguir son las enzimas; estas sustancias son biocatalizadores de origen proteico con una gran actividad y especificidad para su

sustrato correspondiente (Whitaker, 1994). En este trabajo se estudió la desactivación térmica de la *polifenoloxidas* (PPO; 1,2 - benzenodiol; oxígeno oxidoreductasa; EC 1.10.3.2 / EC 1.14.18.1). Su actividad está relacionada con la aparición de tonos marrones en vegetales (pardeamiento enzimático) (Galeazzi y Sgarbieri, 1981; Cano et al., 1990; López et al., 1994a) y presenta una gran actividad en la acelga.

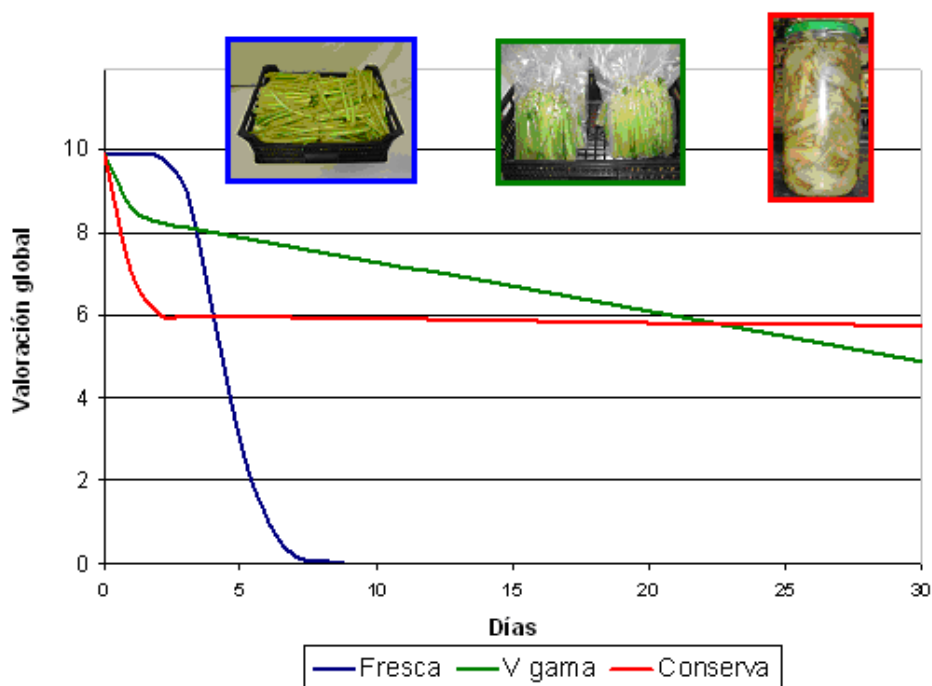


Fig.1.1 Esquema cualitativo-comparativo de tres tipos de productos vegetales

Otro parámetro a seguir, en este caso microbiológico, es la población remanente de la bacteria *Listeria monocytogenes* después de los tratamientos térmicos aplicados sobre el producto. La mayor parte de hortalizas frescas presenta un pH neutro y unas condiciones de agua biodisponible (actividad de agua) y nutrientes adecuadas para el crecimiento de casi cualquier tipo de microorganismo (Taormina et al., 1999). Por ello hay que determinar con qué combinaciones de temperatura-tiempo en el TTS se consigue un riesgo sanitariamente asumible. En este trabajo se estudió la *Listeria monocytogenes* debido a su carácter patógeno y psicrófilo; normalmente se toma como exigencia una reducción de al menos 7 unidades logarítmicas de su población para una correcta pasteurización, considerándose que es suficiente emplear un tratamiento de 2 minutos a 70 °C para productos de V gama (Rybka-Rodgers, 2001; Ohlsson y Bengtsson, 2002).

Siendo clave el tratamiento térmico, la mayoría de estudios sobre la preparación de productos similares se centran en este apartado. Dentro de ellos ha cobrado gran importancia los modelados matemáticos y correspondientes simulaciones, gracias a su gran poder como herramienta de análisis. De los numerosos estudios que avalan su utilidad, hay algunos que combinan los historiales térmicos obtenidos de esta manera con la microbiología predictiva de forma efectiva para poder establecer condiciones de operación o características del producto final (Bellara et al., 2000; Enamorado y Enamorado, 2004; Mir et al., 2008^b).

Capítulo 2

Materiales y métodos

En este capítulo se presentan las unidades estudiadas en este proyecto así como la metodología desarrollada para caracterizarlas térmicamente. También se exponen los modelos matemáticos, simulaciones y métodos de optimización utilizados para el seguimiento de la evolución temporal de la temperatura y de varios parámetros de calidad del producto, así como para el refinamiento del valor de los distintos coeficientes obtenidos en los equipos. Por último, se relatan los pasos llevados a cabo para el procesamiento de un alimento de V gama (pencas de acelga), además de la metodología utilizada para la caracterización de uno de los parámetros de calidad del producto considerados en este estudio, la PPO.

2.1 Equipos para el procesamiento de alimentos de V gama

Las características de los equipos caracterizados durante la realización de este proyecto se detallan a continuación.

Para la etapa de calentamiento se emplearon:

- Un horno mixto convectivo (Convotherm OEB 6.10) capaz de operar con aire seco (rango de T^a de trabajo entre 30 y $250^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) o usando vapor de agua (rango de T^a entre 30 y $120^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) (véase Fig.2.1 a)). La potencia del aire caliente impulsado por el equipo así como la del generador de vapor son de 10,5 y 9,9 kW, respectivamente; el valor necesario de conexión eléctrica es de 11,5 kW y la corriente nominal del equipo, 15,7 A.
- Un cocedero semiindustrial de pasta y vegetales (BOPPAS HD900), el cual consta de un recinto de 45 L y un sensor de nivel para contrarrestar la evaporación. El agua se calienta de forma indirecta gracias a una camisa,

también de agua, que asegura la estabilidad térmica del baño y permite trabajar entre los 65 y 95 °C (véase Fig.2.1 b)).

Para la etapa de enfriamiento se utilizaron las siguientes unidades:

- Un túnel de enfriamiento por aire (modelo planta piloto fabricado por Tarré S.A. para la Universidad de Zaragoza) capaz de inyectar aire frío a distintas velocidades (0 – 100%, variable, dependiendo de la carga del sistema) y temperaturas (hasta - 45°C) (véase Fig.2.1 c)). El citado equipo tiene una potencia de 7,4 kW y utiliza un compresor alternativo semihermético que trabaja con el refrigerante R404A.
- Un baño de hielo constituido por 1 parte de hielo picado y 5 partes de agua (véase Fig.2.1 d)).



Fig. 2.1 Equipos caracterizados en este trabajo

- a) Horno mixto convectivo
- b) Cocedero de pasta y vegetales
- c) Túnel de enfriamiento por aire
- d) Baño de hielo

2.2 Caracterización térmica de equipos

Para obtener los coeficientes convectivos de los equipos citados en el apartado anterior, se registró la evolución temporal de la temperatura en una esfera maciza metálica de acero inoxidable AISI 302 (con un perímetro de 37 cm. y una masa de 7,047 kg), así como en diversos geles fabricados ‘in situ’ para ese propósito (véase Fig.2.2). Las dimensiones medias de los mismos fueron $0,2106 \pm 0,0035 \times 0,1138 \pm 0,0035 \times 0,0194 \pm 0,0020$ (m), análogas a las que corresponderían a una barqueta estándar de un producto de V gama, y estaban compuestos por un 99%_p de agua y un 1%_p de goma gellano, un material gelificante usado ocasionalmente en restauración; se asumió que las propiedades de los geles se correspondían con las del agua líquida debido a la composición de los mismos (véase Anexo A).

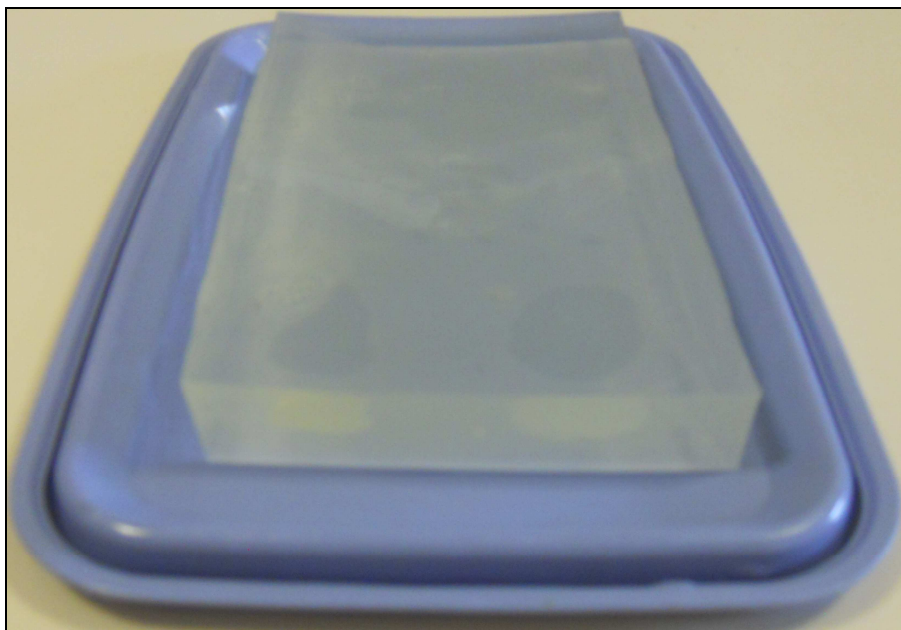


Fig. 2.2 Detalle de los geles empleados para caracterizar los distintos equipos

Para el registro de la temperatura se emplearon varios termopares tipo T, registrándose los valores con un data logger (Testo 177-T4, Reino Unido); uno o dos de ellos se colocaban en el interior de los cuerpos, a través de un perforación que poseía la esfera a un radio de 3,1 cm o en la parte lateral y el punto central de los geles, y otro termopar se usaba como control de la temperatura del medio. En alguno de los experimentos también se registró la presión en el interior del horno; para este propósito se utilizó una sonda de presión y temperatura (Picovacq, TMI Instruments; Francia) (véase Fig. 2.3).

Una vez realizados los estudios previos con los equipos, relativos a la puesta en marcha/apagado de cada unidad, el funcionamiento de las mismas y la uniformidad de temperaturas en su interior (véase Anexo A), se realizaron diversas series de experimentos de calentamiento y enfriamiento en los mismos, sobre los cuerpos comentados anteriormente; dichas series fueron las siguientes:

- Esfera + Horno (trabajando con aire seco): T^a de consigna de 60°C, 70°C, 80°C y 90°C.
- Esfera + Horno (trabajando con vapor): T^a de consigna de 60°C, 70°C, 80°C y 90°C. Algunos experimentos se realizaron con el registrador fuera y dentro del equipo debido a que los cables del mismo impedían el completo cierre de la puerta del horno, imposibilitando así su estanqueidad.
- Esfera + Cocedero: T^a de consigna de 65,2°C, 72,8°C, 74,5°C, 82,8°C y 91,0°C.
- Esfera + Túnel de enfriamiento: T^a de consigna de 4°C y -10°C; velocidades del aire impulsado del 27%, 55%, 81% y 95% de la carga total del sistema.
- Esfera + baño de hielos: T^a de consigna de 0°C.
- Geles + Horno (trabajando con aire seco): T^a de consigna de 80°C y dos posiciones distintas de los geles en el interior del equipo ('horizontal' y 'vertical').
- Geles + Horno (trabajando con vapor): T^a de consigna de 80°C y posiciones 'horizontal' y 'vertical' de los geles en el interior del equipo.
- Geles + Cocedero: T^a de consigna de 70,7°C, 80,8°C y 91,8°C.
- Geles + Túnel de enfriamiento: T^a de consigna de 4°C; velocidades del aire impulsado del 27%, 55%, 81% y 95% de la carga total del sistema.

La evolución temporal de las temperaturas registradas se puede ajustar de forma lineal conforme a las siguientes expresiones, considerando conducción de calor transitoria unidimensional con condiciones de contorno convectivas (Marín y Monné, 1998); para la esfera se tiene que

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 Fo) \frac{\text{sen}(\xi_n r^*)}{(\xi_n r^*)} \underset{\substack{\uparrow \\ Fo \geq 0,2}}{\cong} \theta_0^* \frac{\text{sen}(\xi_1 r^*)}{(\xi_1 r^*)} \quad (\text{ec.2.1})$$

donde:

$\theta^* = \frac{T - T_f}{T_i - T_f}$, es la temperatura adimensional (T_i es la temperatura inicial, T_f la de consigna del sistema y T la temperatura en cada instante)

Fo, es el número adimensional de Fourier, definido como $Fo = \frac{\alpha t}{r_o^2}$ siendo

α , la difusividad térmica de la esfera (m² s⁻¹)

t , el tiempo (s)

r_o , el radio de la esfera (m)

$\theta_o^* = C_1 \exp(-\xi_1^2 Fo)$, es la evolución temporal (adimensional) de la temperatura en el centro de la esfera

$r^* = \frac{r}{r_o}$, es el radio adimensional siendo r la posición radial del punto de medida

C_1 y ξ_1 , son la primera constante y la primera raíz de la ecuación trascendente $1 - \xi \cot g(\xi) = Bi$, tabuladas para cada geometría sencilla (Marín y Monné, 1998)

Bi , es el número adimensional de Biot, definido como $Bi = \frac{hr_o}{\lambda}$ siendo

h , el coeficiente de transmisión de calor ($W m^{-2} K^{-1}$)

r_o , el radio de la esfera (m)

λ , la conductividad térmica de la esfera ($W m^{-1} K^{-1}$)

y para los geles se tiene que

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 Fo) \cos(\xi_n x^*) \cong \theta_o^* \cos(\xi_1 x^*) \quad (ec.2.2)$$

\uparrow
 $Fo \geq 0,2$

donde:

$\theta^* = \frac{T - T_f}{T_i - T_f}$, es la temperatura adimensional (T_i es la temperatura inicial, T_f la de consigna del sistema y T la temperatura en cada instante)

Fo , es el número adimensional de Fourier, definido como $Fo = \frac{\alpha t}{L^2}$ siendo

α , la difusividad térmica del gel ($m^2 s^{-1}$)

t , el tiempo (s)

L , la semilongitud de la pared (m)

$\theta_o^* = C_1 \exp(-\xi_1^2 Fo)$, es la evolución temporal (adimensional) de la temperatura del plano central de la pared

$x^* = \frac{x}{L}$, es una distancia adimensional siendo x la posición del punto de medida

C_1 y ξ_1 , son la primera constante y la primera raíz de la ecuación trascendente $\xi_n \operatorname{tg}(\xi_n) = Bi$, tabuladas para cada geometría sencilla (Marín y Monné, 1998).

Bi , es el número adimensional de Biot, definido como $Bi = \frac{hL}{\lambda}$ siendo

h , el coeficiente de transmisión de calor ($W m^{-2} K^{-1}$)

L , la semilongitud de la pared (m)

λ , la conductividad térmica del gel ($W m^{-1} K^{-1}$)

Una vez registradas y linealizadas las temperaturas en los distintos cuerpos para cada uno de los equipos, con ayuda de los valores de las propiedades físicas de los materiales y diversos métodos de análisis estadístico (Test Q de Dixon y Análisis de Varianza, ANOVA) (véase Anexo A) se obtuvieron los distintos coeficientes de transmisión de calor buscados.

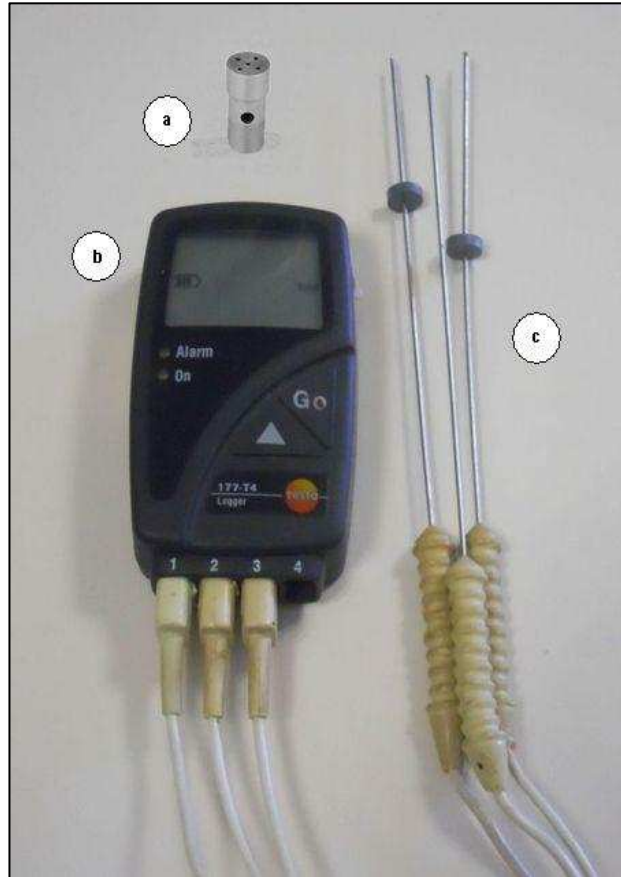


Fig. 2.3 Diversos elementos empleados para el registro de datos
a) Sonda de presión y temperatura (Picovacq)
b) Registrador (Testo 177-T4)
c) Termopares tipo T (Testo)

2.3 Modelado matemático, simulación y optimización

Considerando la naturaleza sólida de los cuerpos utilizados durante la caracterización térmica de los equipos, así como de los envases de verduras y la ausencia de líquido de gobierno en el interior de éstos, los fenómenos bajo estudio se pueden expresar empleando un modelo conductivo puro de transferencia de calor, tridimensional, regido por la ecuación de Fourier y sometido a varias condiciones de contorno (temperatura inicial del sistema conocida, simetría tridimensional y frontera convectiva).

En el caso de los cuerpos paralelepípedicos empleados, dicho modelo se caracteriza por la siguiente ecuación cartesiana:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{ec. 2.3})$$

sujeta a las siguientes condiciones de contorno

- Temperatura inicial conocida (y homogénea en todo el sistema)

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad \forall x, y, z \quad (\text{ec. 2.4})$$

- Simetría tridimensional (de forma que solo es necesario simular un octante del sistema)

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=X/2} = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=Y/2} = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=Z/2} = 0 \quad (\text{ec. 2.5})$$

- Frontera convectiva

$$k \nabla T = h(T_\infty - T) \quad (\text{ec. 2.6})$$

donde:

α es la difusividad térmica del material ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

h es el coeficiente de transmisión de calor convectivo ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

k es la conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

t es el tiempo (s)

T es la temperatura en el nodo de coordenadas x, y, z en un tiempo t ($^\circ\text{C}$)

T_∞ es la temperatura del fluido alrededor del cuerpo ($^\circ\text{C}$)

∇T es el gradiente de temperaturas ($^\circ\text{C m}^{-1}$)

X, Y, Z son los valores máximos de las respectivas coordenadas cartesianas (m)

Para el cuerpo esférico utilizado durante la caracterización térmica de los equipos, el modelo de transferencia de calor es idéntico al mostrado anteriormente aunque su seguimiento resulta más sencillo en coordenadas esféricas.

Los modelos matemáticos anteriores fueron implementados con el entorno de simulación COMSOL Multiphysics 3.4 (concretamente con el Módulo de Transferencia de Calor), incorporando los coeficientes térmicos obtenidos previamente y permitiendo así el estudio de la evolución de un producto V gama tipo.

Se simularon todos y cada uno de los procesos de calentamiento o enfriamiento llevados a cabo en los equipos reales disponibles en el laboratorio, a excepción de

aquellos descartados por medio de los métodos estadísticos empleados (véase Anexo A). Para ello, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Dibujo de la geometría: se generaron las estructuras físicas a estudiar con ayuda de las herramientas de dibujo asistido del programa; se introdujeron las dimensiones de los cuerpos bajo estudio, utilizando sólo un octante de los mismos debido a la simetría presentada.
- Configuración de los dominios geométricos: los cuerpos bajo estudio estaban formados por un solo subdominio geométrico en el que aplicar la ecuación del modelo, esto es, la ecuación de Fourier para la conducción de calor.
- Configuración de las condiciones de contorno: dichas condiciones se correspondían con las de ‘aislamiento térmico’ para las caras simétricas y las de ‘flujo de calor’ (convectivo) para las caras exteriores de los cuerpos.
- Definición de constantes y expresiones: se especificaron el material de trabajo, la temperatura inicial del cuerpo para cada experimento, la temperatura en el interior de cada equipo y el coeficiente de transmisión de calor del mismo.
- Mallado: para seleccionar el tamaño de malla más apropiado, se comprobó la eficiencia de varios tamaños de malla (véase Anexo C). Para las simulaciones con los geles se escogió el tamaño de malla nº 3 (malla más fina), que proporcionaba una eficiencia en la resolución de 140,6 elementos de resolución por tiempo de resolución (s). Para las simulaciones con la esfera, se eligió el tamaño de malla nº 6 (malla gruesa), que proporcionaba una eficiencia en la resolución de 103,6 elementos de resolución por tiempo de resolución (s).
- Resolución del modelo: se eligió un resolutor transitorio, UMFPAK, de método directo, el cual trabaja con una matriz de cálculo no simétrica mediante un método multifrontal. Fue necesario especificar el tiempo total de las simulaciones así como el paso temporal; estos datos se correspondían con los tiempos totales de calentamiento o enfriamiento de los experimentos y con la cadencia de registro de los datos.
- Postprocesado y análisis de los resultados: se utilizaron las gráficas más convenientes para el objeto de este estudio, aprovechando la posibilidad de exportar la evolución temporal de la temperatura simulada para cada experimento. Entre los gráficos utilizados destacan los diagramas de superficie y los gráficos sonda de parámetros.
- Scripts: utilizando el lenguaje de secuencia de comandos COMSOL Script 1.2, se programaron diversos ‘scripts’ con la finalidad de comparar las temperaturas reales registradas y las simuladas y optimizar el valor de los coeficientes de transmisión de calor obtenidos experimentalmente, minimizando la diferencia de temperaturas anteriormente comentada (véase Anexo C y el soporte informático adjunto a este proyecto). Para ello fue necesario guardar los archivos de simulación con la terminación *.m, característica de MATLAB, y el empleo del comando ‘fminsearch’, el cual

encuentra el mínimo de una función escalar sin restricciones usando un método de derivación libre.

Para realizar el seguimiento de los parámetros de calidad del producto durante la simulación, se aprovecharon y combinaron los Módulos de Transmisión de Calor anteriormente comentados, acoplando a los mismos el Módulo de Ingeniería Química que incorpora COMSOL Multiphysics 3.4 y siguiendo los pasos anteriormente descritos, a excepción de la creación de ‘scripts’.

Para los parámetros de calidad estudiados en este proyecto (el patógeno *Listeria Monocytogenes* y la enzima PPO) se consideraron cinéticas de termodependencia de primer orden, tipo Arrhenius, para los mismos; esta dependencia térmica se incluyó en el modelo asociando su cambio a la historia térmica del sistema por regresión lineal (véanse Anexos B y C).

2.4 Caracterización y seguimiento de los parámetros de calidad del producto

En el estudio de la evolución de la población de *Listeria Monocytogenes* durante el tratamiento térmico efectuado a las acelgas, se aseguró una reducción simulada de 7 unidades logarítmicas en la población inicial del patógeno; esta condición fue la que fijó los distintos tiempos de calentamiento para el producto (véase Anexo B).

Para conocer la desactivación térmica de la *polifenoloxidasas* (PPO) se llevaron a cabo experimentos de extracción en las pencas de acelga, así como medidas de su actividad (antes y después de los tratamientos térmicos). También se caracterizó la termorresistencia de dicha enzima, utilizando dichos valores en los modelos matemáticos simulados, así como las constantes cinéticas de la ecuación de Michaelis-Menten para las reacciones en las que la enzima estaba involucrada (véase Anexo D).

2.4.1 Extracción de la PPO

El método de extracción utilizado fue similar al empleado para otros vegetales (Cano et al., 1990).

La PPO de las pencas de acelga fue extraída en un tampón de ácido cítrico/citrato 0,1M con un pH = 5. Se tomaron 30 mL del tampón y se homogenizaron con 10 g/L de PVP (Polivinilpirrolidona K30) (Fluka Chemika, Sigma-Aldrich Chemical Company) y 5 g/L de Tritón X-100 (Sigma Aldrich Chemical Company) para obtener la mezcla donde se realiza la extracción (Galeazzi y Sgarbieri, 1981).

Este tampón se almacenó en refrigeración a 4 °C. Se añadieron alrededor de 20 g de pencas de acelga, cortadas cuidadosamente para no desgarrar sus tejidos e inmediatamente se homogeneizó, en refrigeración a 4 °C, durante tres minutos en un ‘ultraturrax’ (Yellow line T25, Ika-Werker). El homogeneizado se centrifugó (RC 28S,

Dupont-Sorvall) a 4°C durante 30 min. a 12000 rpm. El sobrenadante se filtró con papel Watman n°4, obteniendo un líquido sin ninguna traza en suspensión, el cual constituyó el extracto enzimático.

2.4.2 Medida de la actividad de la PPO

La actividad enzimática se determinó siguiendo la metodología descrita por López et al., (1994a).

La solución de ensayo se compuso de un tampón de 0,05 M de fosfato sódico (pH = 7) y 10 mM de DL-Dopa como sustrato (3,4-dihidroxi-DL-fenilalanina, Sigma Aldrich Chemical Company). La reacción se inició al adicionar 100 µL de extracto enzimático a 1 mL de solución de ensayo. La actividad se determinó midiendo la absorbancia a 25 °C y a 475 nm en un espectrofotómetro UV/VIS (UNICAM UV 500), calculando la tasa de formación de dopacroma a partir de DL-Dopa. Se midió el incremento de absorbancia durante un intervalo de 30 segundos; es importante realizar la medida al principio de la reacción ya que la enzima se inhibe rápidamente (30~90 segundos) con la o-semibenzoquinona, producto intermedio de la reacción (Whitaker, 1994).

La actividad, A, se expresó en unidades de actividad por mililitro y por minuto (UA mL⁻¹ min⁻¹) siendo una UA el equivalente a 0,1 unidades de absorbancia por minuto para el caso que nos ocupa (Flurkey y Jen, 1978).

2.4.3 Termorresistencia de la PPO

Para determinar los valores de tiempo de reducción decimal (D_T) y termorresistencia (Z) claves (véase Anexo B), se procedió siguiendo un método con perfiles de temperatura lineales (Mir et al., 2006). En este método se asume que la inactivación térmica enzimática es de primer orden y se van tomando muestras de la enzima con historiales térmicos diferentes, midiendo su absorbancia para obtener los parámetros buscados.

Los ensayos de inactivación térmica se llevaron a cabo con una velocidad de calentamiento constante (2°C/min) desde 40 hasta 85°C, en un vaso metálico sumergido en un baño termostático agitado. Para verificar la linealidad del calentamiento, la temperatura en el interior del recipiente se registró continuamente con un termopar Almemo ZA 9020-FS NiCr.

Para el tratamiento matemático de los datos, se utilizó la siguiente ecuación de ajuste (López et al., 1994b) y el programa de regresión no lineal 'Enzfitter' (Leatherbarrow, 1987):

$$\log A = \log A_o - \frac{Z}{\alpha D_{T_{ref}}} * 10^{(-T_{ref}/Z)} * (10^{(T/Z)} - 10^{(T_o/Z)}) \quad (\text{ec.2.7})$$

donde:

A es la actividad de la PPO

A_0 es la actividad inicial de la PPO al principio del experimento

Z es la termorresistencia de la PPO (véase Anexo B)

α es la velocidad de calentamiento en el experimento ($^{\circ}\text{C/s}$)

D_{Tref} es el tiempo de reducción decimal a la temperatura de referencia (véase Anexo B)

T_{ref} es la temperatura que se elige para referir los valores de tiempo de reducción decimal y termorresistencia

T es la temperatura a lo largo del experimento

T_0 es la temperatura inicial del experimento

2.5 Procesado de pencas de acelga en V gama

En la realización de este proyecto se han utilizado pencas de acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*) recolectada en los invernaderos de los campos del valle del Ebro, mantenidas en refrigeración a 4°C hasta su tratamiento. Se envasaron 8 muestras que contenían 8 pencas cada una (~ 200 gr.), de unas dimensiones medias de $0,1330 \pm 0,0096 \times 0,1180 \pm 0,0149 \times 0,0250 \pm 0,0053$ (m). Los pasos llevados a cabo para el procesado de las hortalizas como alimento de V gama fueron el cortado, desinfección, lavado, acondicionamiento, envasado al vacío, tratamiento térmico y almacenamiento de las mismas.

En el tratamiento térmico de las acelgas se alteran la mayoría de atributos del producto original; es por ello que el estudio y optimización de esta etapa resultan de vital importancia. Los ciclos de tratamiento térmico a los que fueron sometidos los envases de pencas de acelgas (véase Fig.2.4) se exponen en la Tabla 2.1. Los tiempos de procesado del producto se obtuvieron de trabajos previos, considerando las distintas eficiencias de los equipos disponibles (Rybka-Rodgers, 2001; Ohlsson y Bengtsson, 2002; Mir et al., 2008^b; Fasina y Fleming, 2001) (véase Anexo D).



Fig.2.4 Detalle de los procesos de calentamiento y enfriamiento llevados a cabo en el producto

El seguimiento de la temperatura en el interior de los envases se llevó a cabo con dos termopares tipo T colocados en el centro geométrico y en los laterales de los mismos, sellando con juntas de goma de silicona septa las uniones a fin de garantizar la estanqueidad del producto; otro termopar se colocó en el interior de los equipos como control de la Tª del medio.

Tabla 2.1 Ciclos de tratamiento térmico

Tratamiento	I	II
Calentamiento	Cocedero a 80°C (4')	Cocedero a 66°C (11')
Enfriamiento	Baño de hielo (8')	Túnel (Tª = 4°C, v = 95%) (24')
Tratamiento	III	IV
Calentamiento	Horno - Aire a 80°C (29')	Horno - Vapor a 80°C (7')
Enfriamiento	Baño de hielo (11')	Baño de hielo (13')

Capítulo 3

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los distintos experimentos llevados a cabo durante la realización de este proyecto, referentes a los valores de los coeficientes de transmisión de calor de cada uno de los equipos presentados, a la optimización de los mismos, así como a la caracterización de un parámetro de calidad del producto (la enzima *polifenoloxidas*a (PPO)) y a su seguimiento durante los ciclos de tratamiento térmico diseñados. En los Anexos A, C y D se presentan tablas con toda la información anterior de forma detallada.

3.1 Caracterización térmica de equipos

3.1.1 Cuerpo esférico

3.1.1.1 Horno mixto convectivo

Los registros de temperatura a lo largo del tiempo son similares a los expuestos en la Fig.3.1 y en la Fig.3.2.

Durante algunos de los experimentos, trabajando con aire, se observó vapor condensado sobre la superficie de la esfera; su aparición, especialmente visible en días lluviosos o húmedos, fue debida a la saturación ambiental en vapor de agua. Dichos experimentos se correspondían con aquellos en los que la T^a en el interior del horno no alcanzaba los 73°C. Esto se puede observar en la Fig.3.3, donde se representan las T^a de consigna registradas durante la operación del horno con aire seco. La citada figura indicaría el valor de T^a a partir del cual el sistema de control del equipo ajusta la consigna, trabajando con aire seco, sin el uso de vapor.

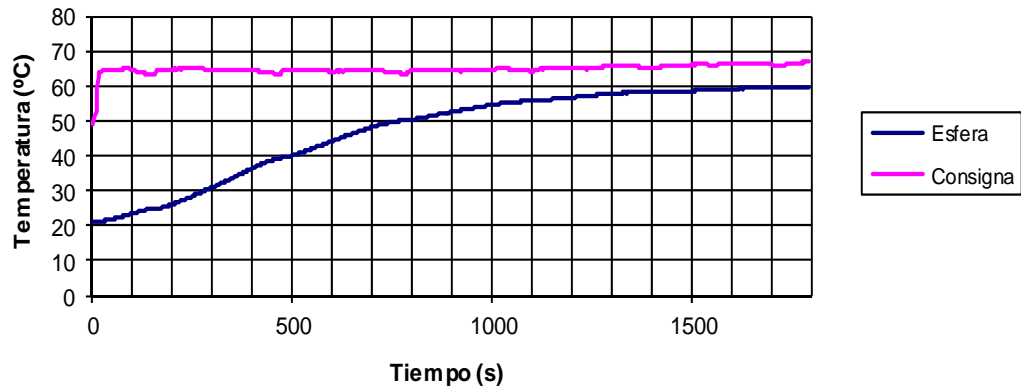


Fig.3.1 Evolución de la T^a en el interior del horno ($T^a_{\text{consigna}} = 60^{\circ}\text{C}$, aire; Réplica 3)

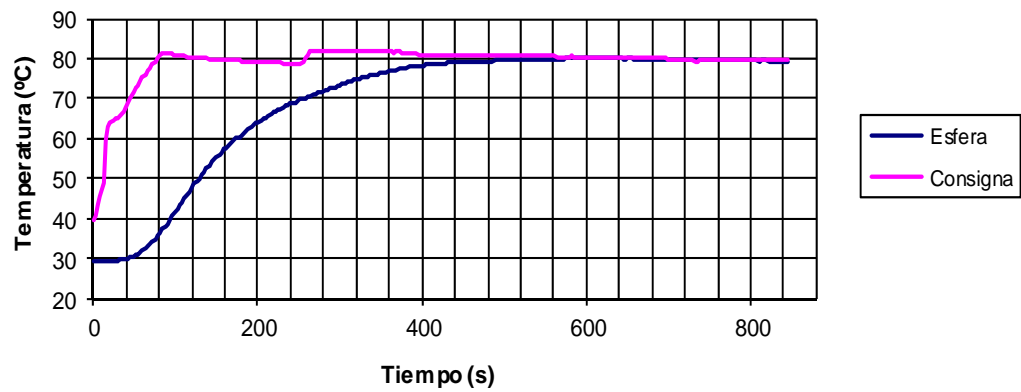


Fig.3.2 Evolución de la T^a en el interior del horno ($T^a_{\text{consigna}} = 80^{\circ}\text{C}$, vapor; Réplica 2)

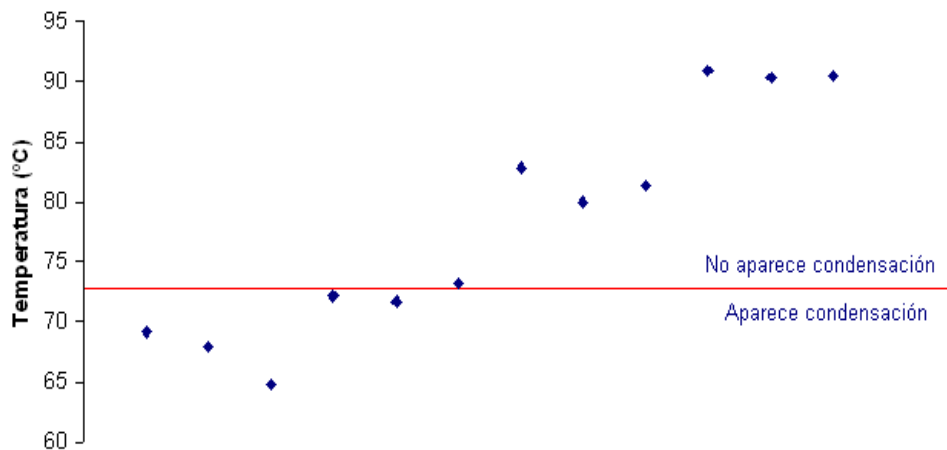
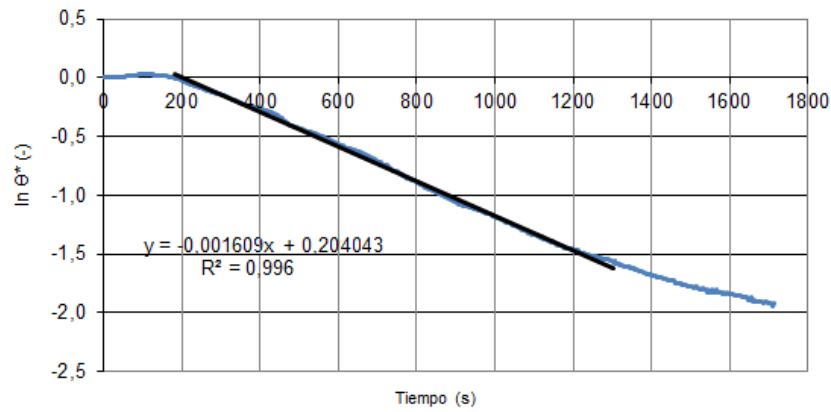
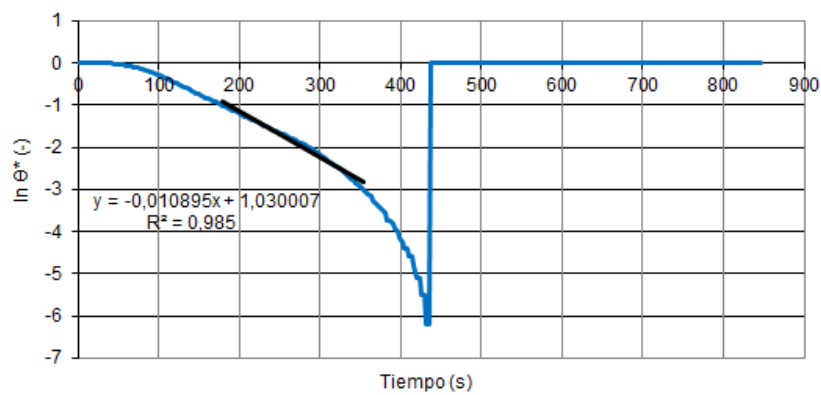


Fig.3.3 Distintas T^a en el interior del horno, trabajando con aire seco

Una vez obtenidos los registros y linealizados los datos conforme a la ec.2.1, se obtuvieron gráficos similares a los expuestos en la Fig.3.4 y en la Fig.3.5.

Fig.3.4 Linealización de los datos obtenidos trabajando con el horno ($T^a_{\text{consigna}} = 60^\circ\text{C}$, aire; Réplica 3)Fig.3.5 Linealización de los datos obtenidos trabajando con el horno ($T^a_{\text{consigna}} = 80^\circ\text{C}$, vapor; Réplica 2)

Los resultados obtenidos tras el tratamiento matemático de los datos registrados se muestran en la Tabla.3.1.

Tabla.3.1 Resultados obtenidos en el horno, trabajando con la esfera

Tratamiento	Esfera - Horno - Aire					
	60 °C	70 °C		80 °C	90 °C	
\bar{h} (W m ⁻² K ⁻¹)	129,3 ± 12,3	119,6 ± 9,3	54,5	56,5 ± 1,6	58,4 ± 4,6	
\bar{h} ANDEVA*	122,2 ± 10,2		57,1 ± 3,2			
Tratamiento	Esfera - Horno - Vapor					
	60 °C		70 °C		80 °C	90 °C
	registrador dentro	registrador fuera	registrador dentro	registrador fuera		
\bar{h} (W m ⁻² K ⁻¹)	423,4 ± 14,2	536,7 ± 138,6	971,4 ± 478,1	721,1 ± 41,4	≈ 5000	≈ 15000
\bar{h} ANDEVA*	491,4 ± 116,2		845,7 ± 333,6		--	--

* Análisis de varianza de 1 factor, $\alpha = 0,05$

El tratamiento estadístico de los resultados permitió agrupar aquellos experimentos en los que aparecía condensación sobre la esfera, trabajando con aire seco en el horno. Los experimentos realizados con el registrador tanto en el interior como en el exterior del equipo (T^a de consigna de 60°C y 70°C, trabajando con vapor) y el tratamiento estadístico de los resultados indicaron que no hay diferencias significativas entre los valores de distintos experimentos, esto es, el valor del coeficiente de transmisión de calor es independiente de la posición del registrador.

También se puede observar como los coeficientes calculados son mayores cuando el equipo utiliza vapor que cuando utiliza aire (para una misma T^a de trabajo), así como la dispersión de los datos obtenidos. Trabajando con vapor a altas T^a , los números de Biot son muy grandes (véase Anexo A) indicando que la conducción en el interior de la esfera es muy lenta en comparación con la convección exterior; de este modo, la conducción interna pasa a ser el mecanismo controlante de la transmisión de calor en dichos casos. Los valores del coeficiente de transmisión de calor, trabajando con aire seco, son similares a los obtenidos en un trabajo previo (Verboven et al., 2000).

3.1.1.2 Cocedero

Los registros de temperatura a lo largo del tiempo durante los experimentos así como la linealización de los datos obtenidos a partir de los mismos, son similares a los obtenidos en el horno, mostrados en el apartado anterior.

Los resultados derivados del tratamiento matemático de los datos registrados se muestran en la Tabla.3.2; las flechas indican la inercia térmica del equipo (véase Anexo A).

Pese al difícil control de la T^a con este equipo, los experimentos son muy reproducibles, observándose cómo el coeficiente de transmisión de calor aumenta de forma proporcional a la T^a de consigna (como también lo hace el número de Biot (véase Anexo A)).

Tabla.3.2 Resultados obtenidos en el cocedero, trabajando con la esfera

Esfera - Cocedero			
Posición del mando y \bar{T} (°C)		\bar{h} ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	\bar{h} ANDEVA*
Mando 1 ↑	65,2	$574,2 \pm 23,4$	--
Mando 2 ↑	72,8	$595,0 \pm 39,0$	$618,9 \pm 36,2$
Mando 2 ↓	74,5	$642,9 \pm 5,5$	
Mando 2÷3 ↓	82,8	$693,4 \pm 10,1$	--
Mando 4 ↓	91,0	$785,5 \pm 34,9$	--

* Análisis de varianza de 1 factor, $\alpha = 0,05$

3.1.1.3 Túnel de enfriamiento por aire

Los registros de temperatura a lo largo del tiempo son similares a los expuestos en la Fig.3.6.



Fig.3.6 Evolución de la T^a en el túnel de enfriamiento ($T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 95\%$; Réplica 1)

Una vez obtenidos los registros y linealizados los datos conforme a la ec.2.1, se obtuvieron gráficos similares a los expuestos en la Fig.3.7, completamente lineales.

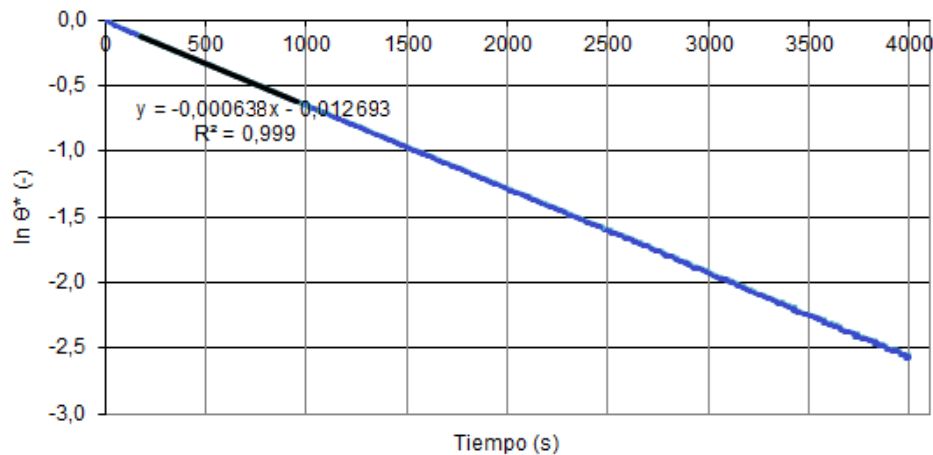


Fig.3.7 Linealización de los datos obtenidos trabajando con el túnel de enfriamiento ($T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 95\%$; Réplica 1)

Los resultados obtenidos tras el tratamiento matemático de los datos registrados se muestran en la Tabla.3.3.

Los experimentos realizados con la chapa metálica en el interior del túnel (véase Anexo A), a fin de guiar el aire a su través, indicaron que la presencia de dicha chapa impide el enfriamiento en comparación con los experimentos realizados sin ella (se obtienen coeficientes de enfriamiento más bajos).

En la Tabla.3.3, también se observa que la T^a de consigna del túnel no es una variable influyente en el valor de los coeficientes de enfriamiento, siéndolo la velocidad

del aire impulsado al modificar el régimen del flujo (a mayor velocidad del aire, mayor turbulencia, n° de Biot más altos y más altos coeficientes de enfriamiento) (véase Anexo A).

Tabla.3.3 Resultados obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con la esfera

Esfera - Túnel de enfriamiento					
Velocidad del aire y T^a (°C)		\bar{h} ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	\bar{h} ANDEVA*		
v = 27 %	4	$29,9 \pm 0,9$	$29,6 \pm 0,6$		
	-10	$29,4 \pm 0,5$			
v = 55 %	4	39,9	$39,1 \pm 1,2$		
	-10	38,2			
v = 81 %	4	49,5	$50,5 \pm 1,5$	$50,3 \pm 0,9$	
	-10	51,6			
v = 95 %	4	$49,8 \pm 0,9$	$50,1 \pm 0,8$		
	-10	$50,6 \pm 0,4$			
v = 27 % **	-10	24,4	--		
v = 95 % **		43,3	--		

* Análisis de varianza de 1 factor, $\alpha = 0,05$

** Experimentos realizados con la chapa metálica en el interior del túnel

3.1.1.4 Baño de hielo

Los registros de temperatura a lo largo del tiempo durante los experimentos así como la linealización de los datos obtenidos a partir de los mismos, son similares a los obtenidos en el túnel de enfriamiento, mostrados en el apartado anterior.

Los resultados obtenidos tras el tratamiento matemático de los datos registrados arrojan un valor del coeficiente de transmisión de calor convectivo de $257,9 \pm 43,3$ ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$). Los experimentos realizados en esta unidad ofrecieron poca reproducibilidad ya que el recipiente era excesivamente pequeño, los hielos se fundieron y la T^a de consigna del baño alcanzó los 6-7°C.

3.1.2 Cuerpo paralelepípedo

3.1.2.1 Horno mixto convectivo

Los registros de temperatura a lo largo del tiempo son similares a los expuestos en la Fig.3.8 y en la Fig.3.9.

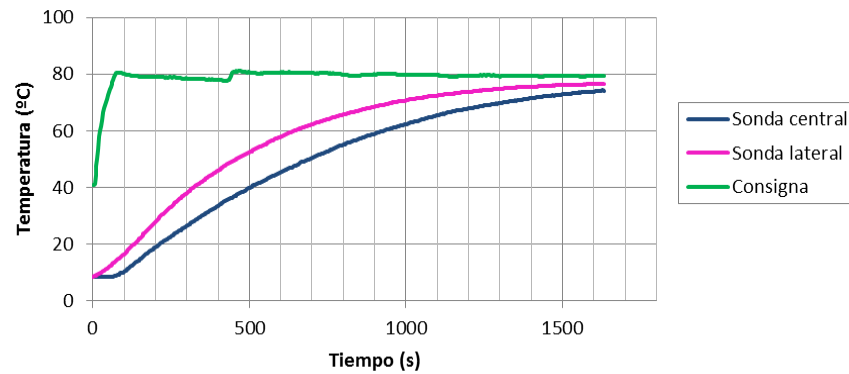


Fig.3.8 Evolución de la Tª en el interior del horno (posición vertical del gel, vapor; Réplica 5)

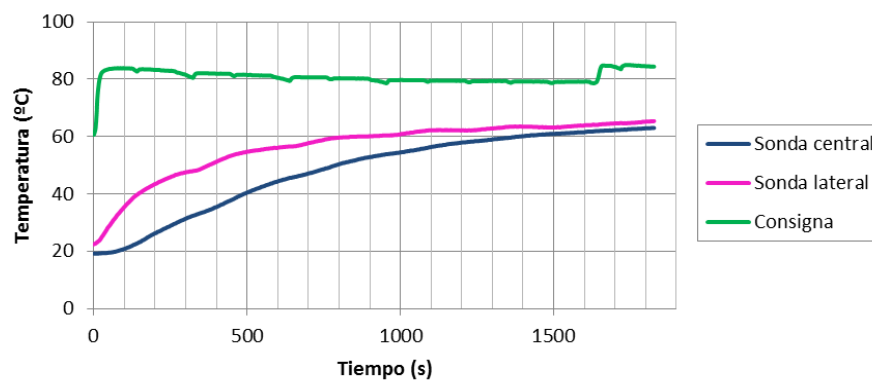


Fig.3.9 Evolución de la Tª en el interior del horno (posición horizontal del gel, aire; Réplica 5)

Una vez obtenidos los registros y linealizados los datos conforme a la ec.2.2, se obtuvieron gráficos similares a los expuestos en la Fig.3.10 y en la Fig.3.11.

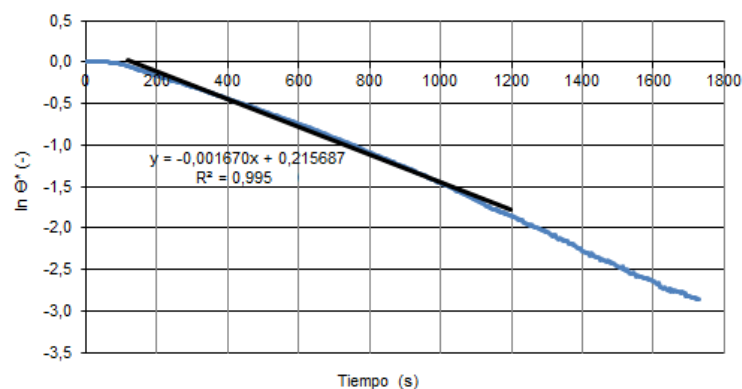


Fig.3.10 Linealización de los datos obtenidos trabajando con el horno (posición vertical del gel, vapor; Réplica 5)

Los resultados obtenidos tras el tratamiento matemático de los datos registrados se muestran en la Tabla.3.4.

Los experimentos realizados con la sonda de presión en el interior del horno no proporcionaron resultados relevantes ya que la presión de trabajo es muy similar a la

presión atmosférica y las variaciones registradas de la misma son mínimas (véase Anexo A).

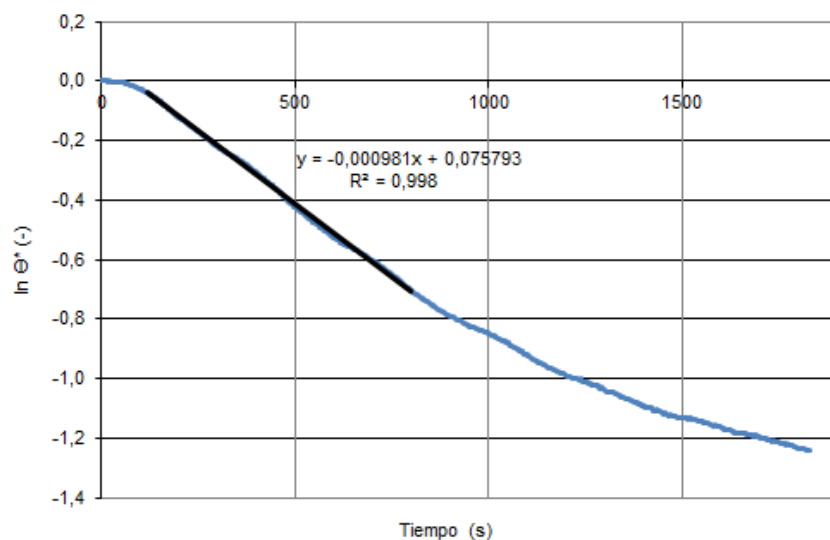


Fig.3.11 Linealización de los datos obtenidos trabajando con el horno (posición horizontal del gel, aire; Réplica 5)

Tabla.3.4 Resultados obtenidos en el horno, trabajando con los geles

Geles - Horno - Aire - 80 °C		
Disposición	Horizontal	Vertical
\bar{T} (°C)	81,4	81,6
\bar{h} (W m ⁻² K ⁻¹)	46,3 ± 10,7	26,6 ± 2,2
Geles - Horno - Vapor - 80 °C		
Disposición	Horizontal	Vertical
\bar{T} (°C)	79,2	79,0
\bar{h} (W m ⁻² K ⁻¹)	361,4 ± 84,2	95,6 ± 22,1

Al igual que ocurre con el cuerpo esférico, con los geles se puede observar cómo los coeficientes calculados son mayores cuando el equipo utiliza vapor que cuando utiliza aire, así como la dispersión de los datos obtenidos.

La posición horizontal de los geles proporciona un mayor coeficiente de transmisión de calor que la posición vertical de los mismos (véase Tabla.3.4). Según la orientación de los geles en el interior del horno, éstos ofrecen una mayor o menor superficie para el desarrollo del flujo de aire caliente, permitiendo de esta manera, para una misma velocidad del aire, una mayor o menor transferencia de calor (véase Fig.3.12).

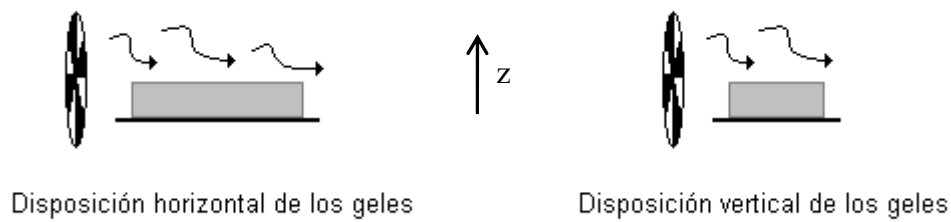


Fig.3.12 Superficies de contacto con el flujo de aire ofrecidas por los geles en sus distintas configuraciones

3.1.2.2 Cocedero

Los registros de temperatura a lo largo del tiempo durante los experimentos así como la linealización de los datos obtenidos a partir de los mismos, son similares a los obtenidos en el horno, mostrados en el apartado anterior.

Los resultados derivados del tratamiento matemático de los datos registrados se muestran en la Tabla.3.5.

Al igual que ocurre con el cuerpo esférico, con los geles se puede observar cómo el coeficiente de transmisión de calor aumenta de forma proporcional a la T^a de consigna (como también lo hace el n° de Biot (véase Anexo A)).

Tabla.3.5 Resultados obtenidos en el cocedero, trabajando con los geles

Geles - Cocedero		
Posición del mando y \bar{T} ($^{\circ}\text{C}$)		\bar{h} ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
Mando 1 ↓	70,7	$248,1 \pm 3,1$
Mando 2 ↓	80,8	$354,3 \pm 46,4$
Mando 4 ↓	91,8	$909,8 \pm 256,4$

3.1.2.3 Túnel de enfriamiento por aire

Los registros de temperatura a lo largo del tiempo son similares a los expuestos en la Fig.3.13.

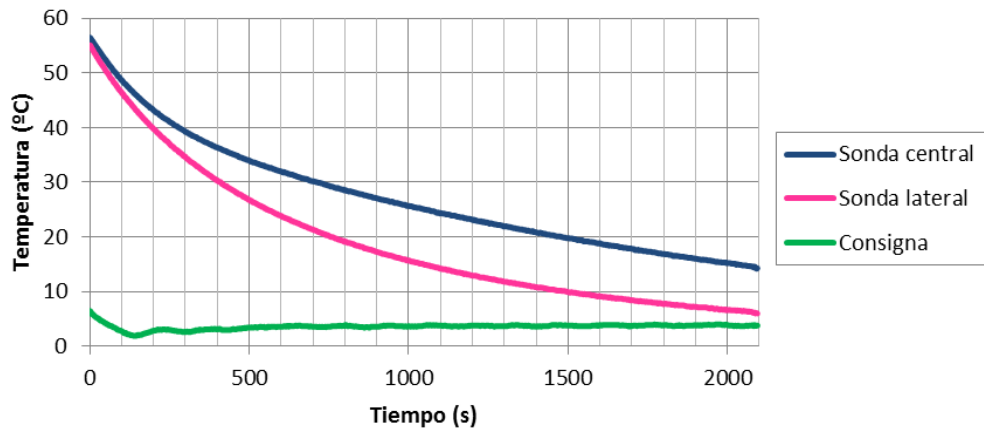


Fig.3.13 Evolución de la T^a en el túnel de enfriamiento ($T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 81\%$; Réplica 1)

Una vez obtenidos los registros y linealizados los datos conforme a la ec.2.2, se obtuvieron gráficos similares a los expuestos en la Fig.3.14.

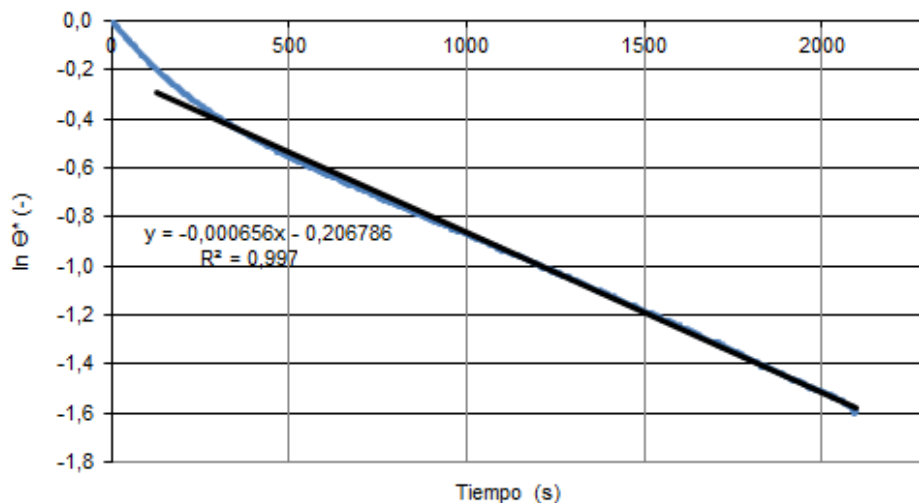


Fig.3.14 Linealización de los datos obtenidos trabajando con el túnel de enfriamiento ($T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 81\%$; Réplica 1)

Los resultados obtenidos tras el tratamiento matemático de los datos registrados se muestran en la Tabla.3.6.

Al igual que ocurre con el cuerpo esférico, con los geles se puede observar cómo el coeficiente de enfriamiento aumenta de forma proporcional a la velocidad del aire impulsado (como también lo hace el número de Biot (véase Anexo A)).

Tabla 3.6 Resultados obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con los geles

Geles - Túnel de enfriamiento			
Velocidad del aire y T^a (°C)		\bar{h} ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	\bar{h} ANDEVA*
$v = 27 \%$	4	$26,0 \pm 1,3$	--
$v = 55 \%$		$29,3 \pm 3,7$	--
$v = 81 \%$		$36,0 \pm 5,8$	$36,1 \pm 3,6$
$v = 95 \%$		$36,1 \pm 2,4$	

* Análisis de varianza de 1 factor, $\alpha = 0,05$

3.2 Validación y optimización de coeficientes térmicos

3.2.1 Cuerpo esférico

En las simulaciones con la esfera solo había colocada una sonda de medida de temperatura por lo que la optimización de los coeficientes térmicos se basó en un único ajuste, el de la temperatura registrada por dicha sonda; también hay que notar que, para cada experimento de optimización, se consideraron ratios de error aceptables ($\Delta T/\text{puntos representados}$) aquellos menores que $0,1 \text{ }^\circ\text{C/punto}$, valor que se corresponde con la precisión de medida de las sondas de temperatura (véase Anexo C).

Un ejemplo gráfico de los experimentos de optimización llevados a cabo, se muestra en la Figura 3.15. En dicha figura se representan, en color rojo, la temperatura registrada durante los experimentos en la esfera y, en color verde, la temperatura simulada (que depende del valor del coeficiente térmico empleado); la gráfica de la izquierda corresponde a una simulación con el uso del coeficiente experimental y la gráfica de la derecha, a la misma simulación con el uso del coeficiente optimizado.

Los resultados de optimización de los coeficientes obtenidos en el horno se muestran en la Tabla 3.7. En el caso del uso de aire seco todos los coeficientes experimentales sin optimizar proporcionaron ratios de error válidos y la optimización se encarga de refinar dichos coeficientes, variando los mismos en un porcentaje que alcanza el 36%. Ocurre lo mismo en el caso de uso de vapor a 60°C , donde la variación del valor de los coeficientes optimizados rondó el 25% con respecto al valor de los coeficientes sin optimizar, a excepción de un experimento en el que el valor del coeficiente optimizado se dobló con respecto al valor del coeficiente experimental. Para el caso del uso de vapor a 70°C , la optimización rebajó todos los coeficientes por debajo

del umbral fijado pero en este caso, la variación porcentual del valor del coeficiente de transmisión de calor toma valores de entre el 75% y más de un 200%.

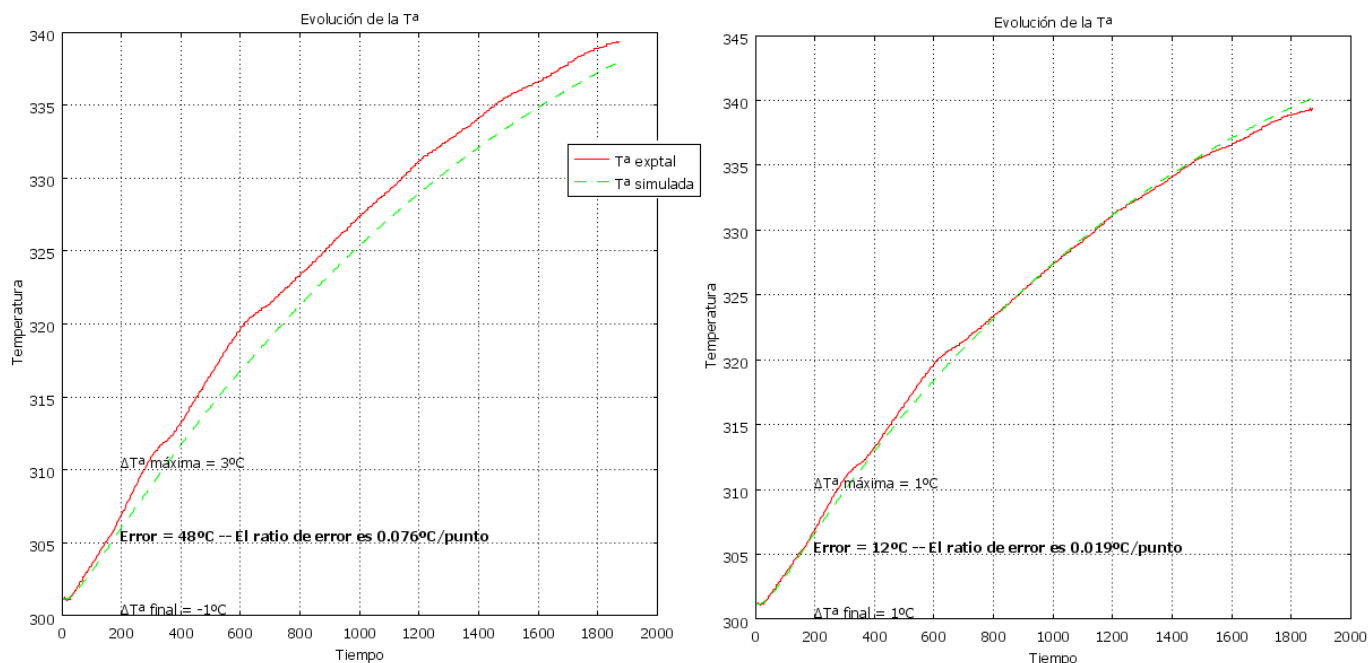


Fig.3.15 Ejemplo de las simulaciones/optimizaciones llevadas a cabo con la esfera

Tabla 3.7 Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el horno, trabajando con la esfera y con un modelo de frontera convectiva

Tratamiento	Esfera - Horno - Aire - Frontera convectiva			
	60 °C y 70 °C		80 °C y 90 °C	
	< 73 °C (SÍ CONDENSA)		> 73 °C (NO CONDENSA)	
\bar{h} (W m ⁻² K ⁻¹)	122,2 ± 10,2		57,1 ± 3,2	
h optimizado	rango de 123,6 a 142,7		rango de 58,3 a 77,9	

Tratamiento	Esfera - Horno - Vapor - Frontera convectiva			
	60 °C		70 °C	
	registrador dentro	registrador fuera	registrador dentro	registrador fuera
\bar{h} (W m ⁻² K ⁻¹)	491,4 ± 116,2		845,7 ± 333,6	
h optimizado	485,1	rango de 601,1 a 977,2	rango de 1922,4 a 2631,5	rango de 1486,0 a 1653,7

Debido a las altas variaciones obtenidas en ciertos valores de los coeficientes, se decidió hacer simulaciones adicionales, con una temperatura superficial fija en la esfera, centrando el problema de transmisión de calor en la conducción interna de la misma y minimizando la resistencia a la convección de calor en el medio. Los resultados obtenidos con estas simulaciones se muestran en el Anexo C. Para dichas simulaciones el cambio de modelo es satisfactorio y los ratios de error tomaron valores aceptables con mínimos cambios en el valor de la temperatura de consigna registrada en el horno.

Los resultados de optimización de los coeficientes obtenidos en el cocedero se muestran en la Tabla 3.8. Para una temperatura baja de trabajo en el cocedero (mando en posición '1') los coeficientes optimizados variaron alrededor de un 33%. Con el mando del equipo en la posición '2' (temperatura de trabajo intermedia/baja), si contamos con una inercia térmica ascendente, los valores de los coeficientes optimizados no consiguieron rebajar el ratio de error con variaciones de los mismos alrededor de un 23%, a excepción de un experimento en el que sí que se consiguió un ratio de error aceptable pero a costa de variar un 72% el valor del coeficiente térmico. Para la misma posición del mando pero con una inercia térmica descendente, variaciones en torno al 23% del valor de los coeficientes térmicos experimentales proporcionaron ratios de error válidos para todos los experimentos. Para una temperatura de trabajo intermedia/alta en el cocedero (mando en una posición media entre la posición '2' y '3') un refinó del 11% de los valores de los coeficientes térmicos experimentales no proporcionó ratios de error aceptables; para conseguir dichos ratios válidos fue necesario variar el valor de los coeficientes entre un 55% y un 65% con respecto a su valor experimental. Por último, para una temperatura de trabajo alta en el cocedero (mando en posición '4') se puede observar cómo, para todos los experimentos, el refinó de los valores de los coeficientes varió entre un 44% y un 88% con respecto a los valores iniciales, proporcionando ratios de error menores de 0,1 °C/punto.

Tabla 3.8 Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el cocedero, trabajando con la esfera y con un modelo de frontera convectiva

Esfera - Cocedero - Frontera convectiva			
Posición del mando y T (°C)		\bar{h} ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	h optimizado
Mando 1 ↑	65,2	$574,2 \pm 23,4$	rango de 758,2 a 765,4
Mando 2 ↑	72,8	$618,9 \pm 36,2$	rango de 753,8 a 1067,3
Mando 2 ↓	74,5		rango de 757,4 a 766,1
Mando 2÷3 ↓	82,8	$693,4 \pm 10,1$	rango de 771,5 a 1141,7
Mando 4 ↓	91,0	$785,5 \pm 34,9$	rango de 1108,0 a 1443,7

Al igual que en las simulaciones trabajando con el horno, para las simulaciones trabajando con la esfera en el cocedero también se decidió utilizar un modelo alternativo, con una temperatura superficial fija en la misma. Dicha decisión se basó en las relativamente altas variaciones del valor de los coeficientes térmicos en algunos experimentos (de entre el 55% y el 88% de su valor con respecto a los valores experimentales). Los resultados obtenidos con estas simulaciones se muestran en el Anexo C. Para dichas simulaciones el modelo propuesto no encaja con la física del problema ya que ningún experimento proporcionó ratios de error aceptables, ni antes ni después de la optimización, y el valor de la temperatura del medio sufrió variaciones importantes (de entre 4 y 8°C), valores de magnitud que se pueden conseguir variando la temperatura de consigna desde el panel de mandos del equipo.

Los resultados de optimización de los coeficientes obtenidos en el túnel de enfriamiento se muestran en la Tabla 3.9. Para todos los experimentos (sin importar la velocidad del aire impulsado por el equipo) los ratios de error obtenidos con los coeficientes optimizados tomaron valores menores de 0,1 °C/punto, si no lo hacían ya con el valor de los coeficientes experimentales sin optimizar. El porcentaje de variación del valor de los coeficientes optimizados con respecto a los no optimizados fue mínimo, oscilando el mismo entre el 3% y el 17%.

Tabla 3.9 Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con la esfera y con un modelo de frontera convectiva

Esfera - Túnel de enfriamiento - Frontera convectiva			
Velocidad del aire y T^a (°C)		\bar{h} ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	h optimizado
$v = 27 \%$	4	$29,6 \pm 0,6$	rango de 32,2 a 32,3
	-10		rango de 32,6 a 33,3
$v = 55 \%$	4	$39,1 \pm 1,2$	43,5
	-10		40,1
$v = 81 \%$	4	$50,3 \pm 0,9$	56,8
	-10		58,6
$v = 95 \%$	4		rango de 56,5 a 57,8
	-10		rango de 58,0 a 58,7

Los resultados de los experimentos de simulación/optimización obtenidos en baño de hielo proporcionaron refinados del valor de los coeficientes térmicos de entre el 80% y el 165% (rango de valores de 464,2 a 527,9 ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)) respecto a su valor inicial ($257,9 \pm 43,3$ ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)), no pudiendo rebajar los ratios de error por debajo del umbral fijado. Debido a la poca reproducibilidad que presentaban los experimentos realizados con el baño de hielo, se descartó realizar cualquier otro tipo de simulación.

3.2.2 Cuerpo paralelepédico

Antes de mostrar y comentar los resultados obtenidos, cabe destacar que el ajuste de la temperatura de la sonda central para cada experimento, situada en el *punto crítico o frío* del cuerpo, tuvo más peso en la optimización de los coeficientes que el ajuste de la sonda lateral; también hay que notar que se consideraron ratios de error aceptables ($\Delta T/\text{puntos representados}$) aquellos menores que 0,1 °C/punto, valor que se corresponde con la precisión de medida de las sondas de temperatura (véase Anexo C).

Un ejemplo gráfico de los experimentos de optimización llevados a cabo, se muestra en la Figura 3.16. En dicha figura se representan, en color rojo, la temperatura registrada durante los experimentos en los geles y, en color verde, la temperatura simulada (que depende del valor del coeficiente térmico empleado). Las gráficas de la

izquierda corresponden a la evolución temporal de la temperatura en la sonda central y las gráficas de la derecha, a la de la sonda lateral; las gráficas de la parte de arriba corresponden a una simulación con el uso del coeficiente experimental y las gráfica de la parte de abajo, a la misma simulación con el uso del coeficiente optimizado.

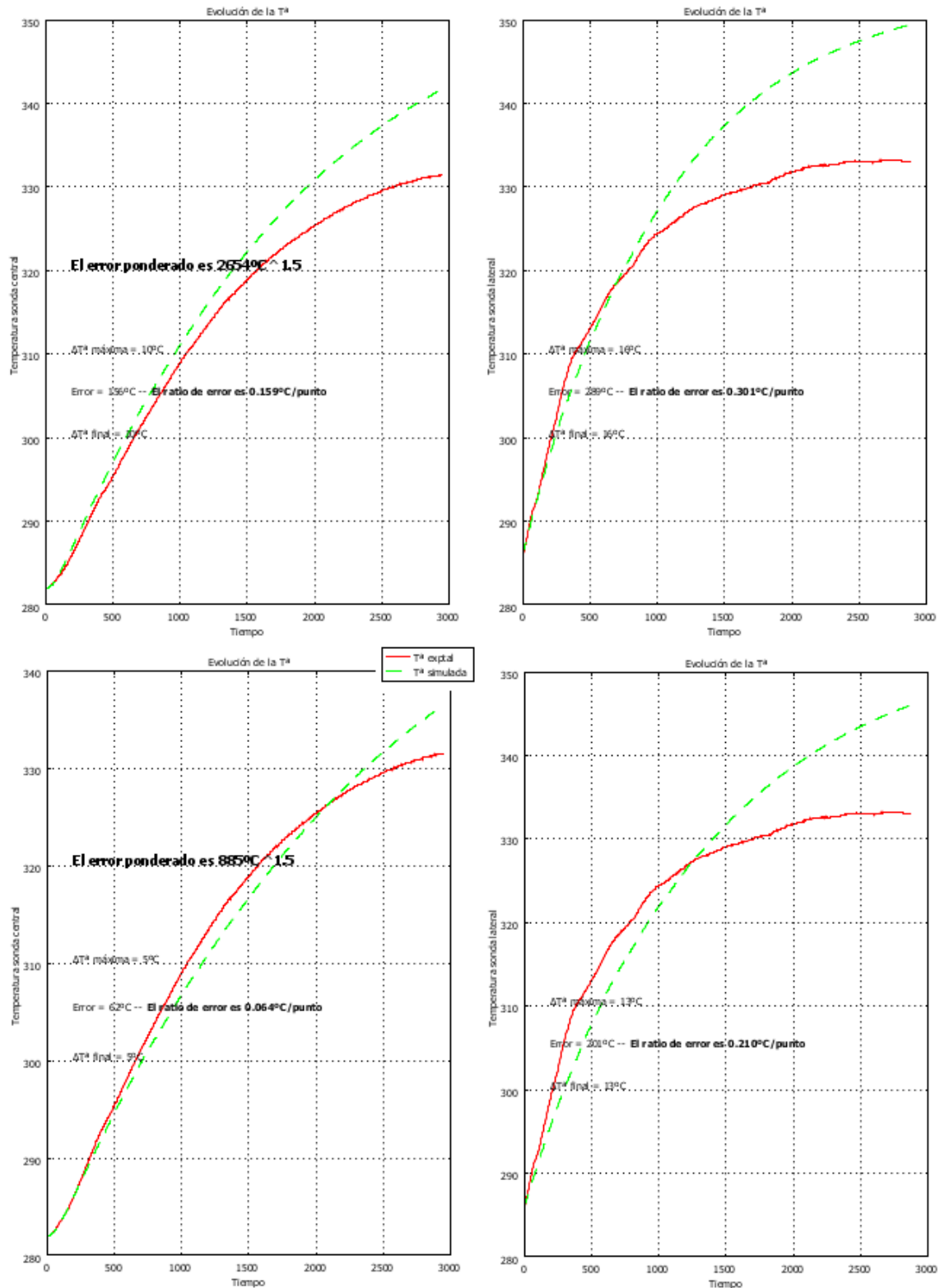


Fig.3.16 Ejemplo de las simulaciones/optimizaciones llevadas a cabo con los geles

Los resultados de optimización de los coeficientes obtenidos en el horno se muestran en la Tabla 3.10. Para el primer bloque de experimentos con el horno (aire a 80°C, geles en posición ‘horizontal’) no se pudieron rebajar los ratios de error hasta un nivel considerado aceptable; la desviación de los valores de los coeficientes optimizados con respecto a los calculados experimentalmente es de entre un 1% y un 35%. Para el resto de experimentos, los coeficientes optimizados de transferencia de calor proporcionaron simulaciones con ratios de error más que aceptables; para el segundo bloque de experimentos (aire a 80°C, geles en posición ‘vertical’) la desviación máxima entre coeficientes es del 20%, mientras que para el tercer y cuarto bloque de experimentos (vapor a 80°C), esta desviación máxima alcanza valores del 42% y 41%, respectivamente.

Tabla.3.10 Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el horno, trabajando con los geles

Geles - Horno - Aire - 80 °C		
Disposición	Horizontal	Vertical
\bar{h} (W m ⁻² K ⁻¹)	46,3 ± 10,7	26,6 ± 2,2
h optimizado	rango de 38,8 a 62,5	rango de 21,2 a 30,5
Geles - Horno - Vapor - 80 °C		
Disposición	Horizontal	Vertical
\bar{h} (W m ⁻² K ⁻¹)	361,4 ± 84,2	95,6 ± 22,1
h optimizado	rango de 208,5 a 333,0	rango de 68,8 a 138,5

Los resultados de optimización de los coeficientes obtenidos en el cocedero se muestran en la Tabla 3.11. La optimización llevada a cabo solo sirvió para mejorar el valor de los coeficientes de los experimentos ‘aceptables’ sin necesidad de optimización ya que para aquellos casos en los que el ratio de error era mayor de 0,1 °C/punto, no se consiguió rebajar dicho ratio por debajo del umbral fijado. Para una temperatura baja de trabajo en el cocedero (mando en posición ‘1’) los coeficientes experimentales fueron válidos según el criterio expuesto anteriormente y la optimización afina su valor variando los mismos en un 9%. Con el mando del equipo en la posición ‘2’ (temperatura de trabajo intermedia) los valores de los coeficientes se optimizaron variando los mismos hasta en un 13%, a excepción de un experimento, en el que no se consiguió rebajar el ratio de error y en el cual la variación del coeficiente térmico optimizado fue casi nula con respecto al valor experimental. Por último, para una temperatura de trabajo alta en el cocedero (mando en posición ‘4’) el refinado de los valores de los coeficientes alcanzó variaciones de un 25% con respecto a los valores iniciales a excepción de un experimento, claramente anormal debido al grandísimo ratio de error presentado, en el que la variación del valor del coeficiente térmico fue de un 65%.

Tabla.3.11 Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el cocedero, trabajando con los geles

Geles - Cocedero			
Posición del mando y T ($^{\circ}\text{C}$)		\bar{h} ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	h optimizado
Mando 1 ↓	70,7	$248,1 \pm 3,1$	rango de 226,9 a 254,3
Mando 2 ↓	80,8	$354,3 \pm 46,4$	rango de 306,6 a 360,7
Mando 4 ↓	91,8	$909,8 \pm 256,4$	rango de 314,7 a 1132,6

Los resultados de optimización de los coeficientes obtenidos en el túnel de enfriamiento se muestran en la Tabla 3.12. La optimización ayudó a mejorar los valores de los coeficientes experimentales ‘validos’ sin necesidad de optimización, variando entre un 12% y un 19% el valor de los coeficientes. Para los experimentos cuyos coeficientes térmicos experimentales proporcionaban un ratio de error comprendido entre 0,1 y 0,2 $^{\circ}\text{C}/\text{punto}$, el uso del algoritmo de optimización afinó el valor de dichos coeficientes, rebajando el ratio de error hasta valores aceptables; la variación del valor de dichos coeficientes oscilaba entre un 28% y un 34% respecto a los valores de los coeficientes térmicos experimentales. Para los casos cuyos coeficientes térmicos experimentales proporcionaron un ratio de error mayor de 0,2 $^{\circ}\text{C}/\text{punto}$, del uso del algoritmo de optimización no resultaron coeficientes mejores que conllevaran una rebaja en los ratios de error para poder considerarlos aceptables, aún a costa de variar sus valores entre un 10% y un 83%.

Tabla.3.12 Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con los geles

Geles - Túnel de enfriamiento			
Velocidad del aire y T^{a} ($^{\circ}\text{C}$)		\bar{h} ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	h optimizado
$v = 27 \%$	4	$26,0 \pm 1,3$	rango de 28,6 a 33,2
$v = 55 \%$		$29,3 \pm 3,7$	rango de 33,6 a 37,7
$v = 81 \%$		$36,1 \pm 3,6$	rango de 48,3 a 66,0
$v = 95 \%$			rango de 40,5 a 42,9

3.3 Procesado de pencas de acelga como alimento de V Gama

3.3.1 Caracterización de la PPO

Se comprobó que la cinética enzimática de la reacción empleada para medir la actividad de la PPO era una cinética michaeliana, respondiendo al mecanismo propuesto por Michaelis-Menten (Voet y Voet, 2004).

Las velocidades máximas de reacción y las constantes de Michaelis-Menten para distintos medios ácidos de reacción (valores de pH = 5, pH = 6 y pH = 7) fueron de 116,67 UA mL⁻¹ min⁻¹ y 18,52 mM, 424,84 UA mL⁻¹ min⁻¹ y 29,92 mM y 410,51 UA mL⁻¹ min⁻¹ y 28,21 mM, respectivamente.

Con relación a la termodestrucción de la PPO, se caracterizó la misma en diversos medios ácidos (valores de pH = 5, pH = 6 y pH = 7), obteniendo los siguientes valores para el tiempo de reducción decimal (D_T) y para la termorresistencia (Z):

- D₈₀ = 31,83 s y Z₈₀ = 13,38 °C, para pH = 5
- D₈₀ = 53,44 s y Z₈₀ = 11,93 °C, para pH = 6
- D₈₀ = 145,10 s y Z₈₀ = 15,65 °C, para pH = 7

3.3.2 Tratamientos térmicos

Los ciclos de tratamiento térmico a los que fueron sometidos los envases de pencas de acelgas resultaron ser muy cortos ya que difícilmente se alcanzó la temperatura de consigna de los equipos en el *punto crítico* o *frío* del sistema. Esto quiere decir que el calor no penetró lo suficientemente bien en los cuerpos bajo estudio como para alcanzar el grado de pasteurización deseado y que, posteriormente, el calor no se evacuó de forma rápida para alcanzar la temperatura de almacenamiento buscada. Las diferencias de temperatura entre las consignas de los equipos y las sondas colocadas en la posición central de los cuerpos varió entre 4 °C y 17 °C para la etapa de calentamiento y entre 2 °C y 12 °C para la etapa de enfriamiento, dependiendo de los ciclos aplicados.

Después de aplicar los tratamientos térmicos a los envases de pencas de acelga, se midió la actividad remanente de la PPO en los mismos y se comparó con valores previos obtenidos antes de los tratamientos. Los porcentajes de actividad remanente encontrados fueron los siguientes:

- Tratamiento I: 34,30% de actividad remanente para la muestra 1 y 28,73% de actividad remanente para la muestra 2.

- Tratamiento II: 41,17% de actividad remanente para la muestra 3 y 37,67% de actividad remanente para la muestra 4.
- Tratamiento III: 4,03% de actividad remanente para la muestra 5 y 7,31% de actividad remanente para la muestra 6.
- Tratamiento IV: 30,44% de actividad remanente para la muestra 7 y 32,28% de actividad remanente para la muestra 8.

Posteriormente, se simularon los ciclos de tratamiento térmico a los que fueron sometidos los envases con el fin de conocer la reducción alcanzada en la población de *Listeria Monocytogenes*, así como la coincidencia o no de la evolución temporal de la temperatura y del grado de desactivación térmica de la PPO. Los registros de temperatura obtenidos se muestran en la Fig.3.17.

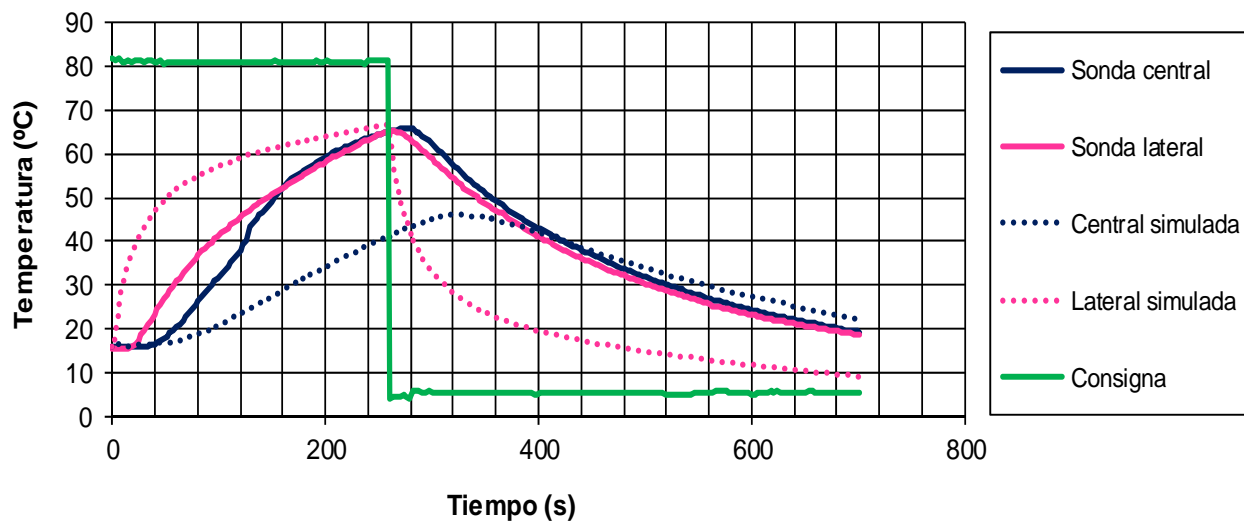


Fig.3.17 Comparativa de temperaturas real y simulada en las pencas de acelga (Tratamiento I, Muestra 2)

Gracias a la simulación numérica y a la microbiología predictiva, se comprobó que la reducción de la población de *Listeria* en los envases de pencas de acelga no había alcanzado ni un orden de magnitud, cuando el grado de pasteurización deseado era de siete; de este modo, la acelga procesada en V Gama no respondía a los estándares de calidad y seguridad microbiológica fijados previamente, por lo que se propusieron tratamientos distintos.

La diferencia de temperaturas observada en la Fig.3.17 entre las temperaturas reales (registradas en los envases de acelga) y las simuladas es muy amplia, poniendo en duda la idoneidad de la herramienta de simulación para representar la evolución de las características del producto. Dicha diferencia se puede justificar con errores producidos al modelar la geometría de los paquetes de acelga; en el modelo de simulación, el envase viene representado por un paralelepípedo cuando los envases, realmente, eran muy irregulares (véase Fig.3.18).



Fig.3.18 Detalle de los envases de acelga

Los porcentajes de actividad remanente de PPO obtenidos con la simulación tampoco coincidieron con los obtenidos experimentalmente en los envases de acelga sometidos a tratamiento térmico. Los resultados de la simulación fueron los siguientes:

- Tratamiento I: 85,12% de actividad remanente para la muestra 1 y 83,17% de actividad remanente para la muestra 2 (frente a 34,40% y 28,73%, respectivamente, para las muestras reales).
- Tratamiento II: 58,60% de actividad remanente para la muestra 3 y 59,67% de actividad remanente para la muestra 4 (frente a 41,17% y 37,67%, respectivamente, para las muestras reales).
- Tratamiento III: 44,80% de actividad remanente para la muestra 5 y 61,33% de actividad remanente para la muestra 6 (frente a 4,03% y 7,31%, respectivamente, para las muestras reales).
- Tratamiento IV: 74,92% de actividad remanente para la muestra 7 y 69,34% de actividad remanente para la muestra 8 (frente a 30,44% y 32,28%, respectivamente, para las muestras reales).

Dicha diferencia entre los valores expuestos se puede explicar, de nuevo, asumiendo errores en el modelo de simulación; las propiedades físicas del envase de acelgas simulado eran homogéneas, así como la concentración inicial de PPO, mientras que los envases reales estaban formados por 8 pencas distintas, las cuales presentaban una gran variabilidad en sus propiedades (Agüero et al., 2005; Fennema, 2010; Sams, 1999; Lee y Kader, 2000). Del mismo modo, el valor tomado como referencia para calcular el porcentaje de desactivación térmica de la PPO, puede ser muy variable, teniendo gran influencia en los resultados mostrados.

Tras comprobar el incorrecto procesado de las pencas de acelga, se propusieron nuevos tratamientos, con ayuda de la simulación, que sí proporcionarían un producto que

cumpliera los requisitos exigidos (reducción de 7 unidades logarítmicas de la población de *Listeria* y temperatura de almacenamiento del producto de 4°C); dichos ciclos de tratamiento se muestran en la Tabla.3.13:

Tabla.3.13. Ciclos de tratamiento térmico propuestos

Tratamiento	Calentamiento		Enfriamiento		tiempo total (s)	% PPO remanente
	Equipo	tiempo (s)	Equipo	tiempo (s)		
I	Cocedero a 80 °C	660	Baño de hielo	1320	1980	12%
II	Cocedero a 66 °C	1080	Túnel (Tª = 4 °C, v = 95%)	5220	6300	16%
III	Horno - Aire a 80 °C	2820	Baño de hielo	2520	5340	4%
IV	Horno - Vapor a 80 °C	1260	Baño de hielo	2640	3900	6%

Capítulo 4

Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se exponen las principales conclusiones extraídas del presente Proyecto Fin de Carrera, así como líneas de trabajo para continuarlo y/o completarlo en un futuro.

Con respecto a la caracterización térmica de los equipos, se puede comprobar como al trabajar con el cuerpo esférico, se obtienen mayores coeficientes de transmisión de calor que al trabajar con los cuerpos paralelepípedicos.

Tanto para la esfera como para los geles, los experimentos realizados en el horno trabajando con aire seco son más reproducibles que los realizados trabajando con vapor, aunque los coeficientes térmicos obtenidos son mucho más pequeños. El uso del cocedero proporciona coeficientes algo más altos que los del horno trabajando con vapor, para similares T^a de consigna; además, los experimentos realizados con el cocedero muestran resultados con menos desviaciones.

Para los equipos de la etapa de enfriamiento se obtienen coeficientes mucho mayores utilizando el baño de hielos que utilizando el túnel a distintas velocidades; por contra, el baño de hielos ofrece poca reproducibilidad.

En resumen, trabajar con aire (túnel de enfriamiento y horno en modo aire seco) proporciona coeficientes de transmisión de calor más pequeños que si trabajamos con agua (baño de hielos y horno en modo vapor), aunque los experimentos muestran desviaciones también más pequeñas. La excepción se encuentra en el cocedero, equipo que trabaja con agua y en el cual los experimentos realizados son muy reproducibles, además de proporcionar coeficientes de transmisión de calor elevados.

Con respecto al entorno de simulación COMSOL Multiphysics 3.4 y su lenguaje de comandos, COMSOL Script 1.2, se ha puesto de manifiesto su gran versatilidad y sencillez, así como su poder de cálculo. Dichas herramientas deberían ser conocidas a fondo para poder aprovechar todo el potencial que acumulan a la hora de tratar problemas de fluidodinámica computacional y otros fenómenos.

En lo referente a la optimización de los coeficientes térmicos convectivos de los equipos con ayuda de las dos herramientas anteriormente citadas, hay que destacar que varios experimentos no consiguieron rebajar los ratios de error asociados a los mismos por debajo del nivel considerado como aceptable; dichos experimentos presentaban unos números de Biot característicos cercanos o superiores a uno. Estos números indican una importancia similar de los fenómenos de convección en la superficie del cuerpo y de conducción dentro del mismo; es por ello que ninguno de los modelos de simulación utilizados pudieron resolver de manera satisfactoria la optimización, ya que utilizaban modelos convectivos o conductivos puros. Aun así, las variaciones registradas en los valores de los coeficientes durante su optimización no variaban en O.M., ni muchísimo menos.

Una alternativa que se podría utilizar para comprobar la bondad del valor de los coeficientes, experimentales y optimizados, serían las gráficas de transferencia de calor de Heisler-Gröber (Levenspiel, 1996).

Respecto a los ciclos de tratamiento térmico sobre productos reales, la simplicidad de la representación de los envases de acelga y la enorme anisotropía presente en los mismos (característica común a todos los productos naturales) condujeron a sorpresivas desviaciones en los resultados obtenidos. Los errores en el dibujo del modelo de simulación se podrían eliminar con el uso de un escáner 3D.

Como complemento a este proyecto, se podrían estudiar la variación del color y la textura de las acelgas con estos mismos tratamientos y equipos. También se podría caracterizar la evolución de otro tipo de enzimas presentes en frutas y hortalizas.

Posibles líneas de trabajo futuras serían las de, aplicando una metodología similar y reutilizando las aplicaciones informáticas creadas, investigar el desarrollo de productos similares en V Gama (cardo, alubias con patatas, incorporación de salsas...) o las de analizar otros alimentos con geometrías distintas, como tallos cilíndricos de borraja, 'pouches' (bolsas semirrígidas) de aceitunas, cremas, sopas, etc.

Otras líneas de trabajo futuras distintas de las anteriores, enfocarían el mismo en la dirección de la utilización de los diversos equipos a escala semiindustrial (restauración). Se podría estudiar la eficiencia económica de los equipos (gastos de electricidad y agua) en función de la cantidad de producto a tratar, así como la variación de la eficiencia de los equipos en función de la carga de los mismos. También se podrían comparar diversas marcas y modelos disponibles en el mercado, así como intentar encontrar equipos de enfriamiento con mayor reproducibilidad y coeficientes de enfriamiento más altos (equipos con chorros de agua fría o similares).

Bibliografía

- Agüero, M.V.; Pereda, J.; Roura, S.I.; Moreira, M.R. y del Valle, C.E. (2005). *Sensory and biochemical changes in Swiss chard (Beta vulgaris) during blanching*. Food Science and Technology, vol. 38, Issue 7. pp. 772 – 778.
- Alcusón, G.; Mir, J.; Oria, R. y Salvador, M.L. *Influencia de la eficacia térmica del pasterizador en la textura de pencas de acelga en V gama*. Avances en maduración y post-recolección de frutas y hortalizas (Ferrer, A. (coord.); Oria, R. (coord.) y Val, J. (coord.)). 1ª ed. Zaragoza: Ed. Acribia, 2008. pp. 716 – 722. ISBN: 978 – 84 – 200 – 1111 - 0
- Aydemir, T. (2004). *Partial purification and characterization of polyphenol oxidase from artichoke (Cynara scolymus L.) heads*. Food Chemistry, vol. 87, Issue 1. pp. 59 - 67.
- Bellara, S.R.; McFarlane, C.M.; Thomas, C.R. y Fryer, P.J. (2000). *The growth of Escherichia coli in a food simulant during conduction cooling: combining engineering and microbiological modelling*. Chemical Engineering Science, vol. 55, Issue 24. pp. 6085 - 6095.
- Brackett, R.E. (1999). *Incidence, contributing factors and control of bacterial pathogens in produce*. Postharvest Biology and Technology, vol. 15, Issue 3. pp. 305 – 311.

- Cano, M.P.; Marín, M.A. y Fúster, C. (1990). *Effects of some thermal treatments on polyphenoloxidase and peroxidase activity of banana* (Musa Cavendishii, var enana). Journal of the Science of Food and Agriculture, vol. 51, Issue 2. pp. 223 - 231.
- Creed, P.G. (1995). *The sensory and nutritional quality of 'sous vide' foods*. Food Control, vol. 6, Issue 1. pp. 45 – 52.
- Enamorado Plaza, J. y Enamorado Solanes, R. *Programa de simulación y optimización de los parámetros microbiológicos, fisicoquímicos y bioquímicos en los tratamientos térmicos, utilizando elementos y diferencias finitas*. Actas del III Congreso Español de Ingeniería de Alimentos, Pamplona (2004). CD-Rom. ISBN: 84 – 688 – 7989 - 4
- Fasina, O.O. y Fleming, H.P. (2001). *Heat transfer characteristics of cucumbers during blanching*. Journal of Food Engineering, vol. 47, Issue 3. pp. 203 – 210.
- Fennema, O.R. *Química de los Alimentos*. 3ª ed. Zaragoza: Ed. Acribia, 2010. ISBN: 978 – 84 – 200 – 1142 - 4
- Flurkey, W.H. y Jen, J.J. (1978). *Peroxidase and polyphenol oxidase activities in developing peaches*. Journal of Food Science, vol. 43, Issue 6. pp. 1826 - 1828.
- Galeazzi, M. y Sgarbieri, V.C. (1981). *Substrate specificity and inhibition of polyphenoloxidase (PPO) from a dwarf variety of banana* (Musa Cavendishii, L.). Journal of Food Science, vol. 46, Issue 5. pp. 1404 - 1406.
- Leatherbarrow, R.J. (1987). ENZFITTER. *A Non linear Regression Data Analysis Program for the IBMPC*. Elsevier BIOSOFT, Cambridge, UK.
- Lee, S.K. y Kader, A.A. (2000). *Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops*. Postharvest Biology and Technology, vol. 20, Issue 3. pp. 207 – 220.
- Levenspiel, O. *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. 1ª ed. Barcelona: Ed. Reverté, 1996. ISBN: 84 – 291 – 7968 – 2
- López, P.; Sala, F.J.; de la Fuente, J.L.; Condón, S.; Raso, J. y Burgos, J. (1994a). *Inactivation of peroxidase, lipxygenase and polyphenol oxidase by manothermosonication*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol. 42, Issue 2. pp. 252 - 256.
- López, P.; de la Fuente, J.L. y Burgos, J. (1994b). *Temperature-dependence of lipxygenase heat inactivation; evaluation with linearly increasing temperature profiles*. Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und Forschung A – Food Research and Technology, vol. 199, Issue 4. pp. 281 – 284.
- Marín, J.M. y Monné, C. *Transferencia de calor*. 1ª ed. Zaragoza: Editorial Kronos, 1998. ISBN: 84 – 88502 – 72 - 9

- Mir, J. *Procesado de borraja en V gama: control de calidad y optimización del tratamiento térmico*. Proyecto Fin de Carrera IQ. Salvador, M.L. (dir.) y Peña, J.A. (dir.). Centro Politécnico Superior, Zaragoza, 2004.
- Mir, J.; Ferrer, A. y López, P. (2006). *Rhizopus oryzae endopolygalacturonase and Borago officinalis polyphenol oxidase thermostability, isothermal and thermal gradient methods*. American Journal of Food Technology, vol. 1, Issue 2. pp. 158 - 165.
- Mir, J.; Oria, R. y Salvador M.L. (2008^a). *Control parameters for sous-vide cook-chill processing of swiss chard (Beta vulgaris) stems*. Food Science & Technology International, vol. 14, Suppl. 5. pp. 117 – 122.
- (2008^b). *Control parameters for sous-vide cook-chill processing of borage (Borago officinalis) stems*. Acta Horticulturae, nº 802. pp. 177 – 182.
- Ohlsson, T. y Bengtsson, N. *Minimal processing of foods with thermal methods*. Minimal Processing Technologies in the Food Industry (Ohlsson, T. (ed.) y Bengtsson, N. (ed.)). 1^a ed. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2002. pp. 12 - 13. ISBN: 1 – 85573 – 547 – 4
- Rybka-Rodgers, S. (2001). *Improvement of food safety design of cook-chill foods*. Food Research International, vol. 34, Issue 5. pp. 449 – 455.
- Sams, C.E. (1999) *Preharvest factors affecting postharvest texture*. Postharvest Biology and Technology, vol. 15, Issue 3. pp. 249 – 254.
- Schellekens, M. (1996). *New research issues in sous-vide cooking*. Trends in Food Science & Technology, vol. 7, Issue 8. pp. 256 – 262
- Taormina, P. J.; Beuchat, L.R. y Slutsker, L. (1999). *Infections associated with eating seed sprouts: an international concern*. Emerging Infectious Diseases, vol. 5, Issue 5. pp. 626 – 634
- Verboven, P.; Scheerlinck, N.; De Baerdemaeker, J. y Nicolai, B.M. (2000). *Computational fluid dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven*. Journal of Food Engineering, vol 43, Issue 2. pp. 61 – 73.
- Voet, D. y Voet, J.G. *Bioquímica*. 3^a ed. Montevideo: Editorial Médica Panamericana, 2004. pp. 492 – 496. ISBN: 950 – 06 – 2301 - 3
- Whitaker, J.R. *Principles of enzymology for the food sciences*. 2^a ed. New York: Ed. Dekker, 1994. ISBN: 0824791487

Índice de figuras

1.1	Esquema cualitativo-comparativo de tres tipos de productos vegetales.....	4
2.1	Equipos caracterizados en este trabajo.....	6
	a) Horno mixto convectivo.....	6
	b) Cocedero de pasta y vegetales.....	6
	c) Túnel de enfriamiento por aire.....	6
	d) Baño de hielo.....	6
2.2	Detalle de los geles empleados para caracterizar los distintos equipos.....	7
2.3	Diversos elementos empleados para el registro de datos.....	10
	a) Sonda de presión y temperatura (Picovacq).....	10
	b) Registrador (Testo 177-T4).....	10
	c) Termopares tipo T (Testo).....	10
2.4	Detalle de los procesos de calentamiento y enfriamiento llevados a cabo en el producto.....	15
3.1	Evolución de la T^a en el interior del horno ($T^a_{\text{consigna}} = 60^{\circ}\text{C}$, aire; Réplica 3)...	18
3.2	Evolución de la T^a en el interior del horno ($T^a_{\text{consigna}} = 80^{\circ}\text{C}$, vapor; Réplica 2).	18
3.3	Distintas T^a en el interior del horno, trabajando con aire seco.....	18
3.4	Linealización de los datos obtenidos trabajando con el horno ($T^a_{\text{consigna}} = 60^{\circ}\text{C}$, aire; Réplica 3).....	19
3.5	Linealización de los datos obtenidos trabajando con el horno ($T^a_{\text{consigna}} = 80^{\circ}\text{C}$, vapor; Réplica 2).....	19
3.6	Evolución de la T^a en el túnel de enfriamiento ($T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 95\%$; Réplica 1).....	21
3.7	Linealización de los datos obtenidos trabajando con el túnel de enfriamiento ($T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 95\%$; Réplica 1).....	21
3.8	Evolución de la T^a en el interior del horno (posición vertical del gel, vapor; Réplica 5).....	23
3.9	Evolución de la T^a en el interior del horno (posición horizontal del gel, aire; Réplica 5).....	23
3.10	Linealización de los datos obtenidos trabajando con el horno (posición vertical del gel, vapor; Réplica 5).....	23
3.11	Linealización de los datos obtenidos trabajando con el horno (posición horizontal del gel, aire; Réplica 5).....	24

3.12	Superficies de contacto con el flujo de aire ofrecidas por los geles en sus distintas configuraciones.....	25
3.13	Evolución de la T^a en el túnel de enfriamiento ($T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 81\%$; Réplica 1).....	26
3.14	Linealización de los datos obtenidos trabajando con el túnel de enfriamiento ($T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 81\%$; Réplica 1).....	26
3.15	Ejemplo de las simulaciones/optimizaciones llevadas a cabo con la esfera.....	28
3.16	Ejemplo de las simulaciones/optimizaciones llevadas a cabo con los geles.....	31
3.17	Comparativa de temperaturas real y simulada en las pencas de acelga (Tratamiento I, Muestra 2).....	35
3.18	Detalle de los envases de acelga.....	36
A.1	Posición de las sondas en el interior del horno.....	58
A.2	Evolución de la T^a en el interior del horno usando aire seco.....	58
A.3	Evolución de la T^a en el interior del horno usando vapor.....	59
A.4	Posición de las sondas en la bandeja del horno y distintas posiciones de la misma en el interior del equipo.....	60
A.5	Evolución de la T^a en la bandeja del horno, colocada en la posición superior....	60
A.6	Evolución de la T^a en la bandeja del horno, colocada en la posición media.....	60
A.7	Evolución de la T^a en la bandeja del horno, colocada en la posición inferior.....	61
A.8	Evolución de la T^a en el cocedero (mando en la posición '2').....	62
A.9	Evolución de la T^a en el cocedero (mando en la posición '4').....	62
A.10	Distintas posiciones de las sondas de T^a en el interior del túnel.....	63
A.11	Evolución de la T^a en el interior del túnel (parte superior, $T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 27\%$).....	63
A.12	Evolución de la T^a en el interior del túnel (parte superior, $T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 95\%$).....	64
A.13	Evolución de la T^a en el interior del túnel (parte inferior, $T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 27\%$).....	64
A.14	Evolución de la T^a en el interior del túnel (parte inferior, $T^a_{\text{consigna}} = 4^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{aire}} = 95\%$).....	64
A.15	Posición del cuerpo esférico en el interior del horno durante la realización de las pruebas.....	68
A.16	Posición del cuerpo esférico en el interior del cocedero durante la realización de las pruebas.....	69
A.17 a)	Posición del cuerpo esférico en el interior del túnel durante la realización de las pruebas.....	70
b)	Posición de la chapa metálica en el interior del túnel para guiar el aire frío a su través.....	70
A.18	Materiales utilizados en la fabricación de los geles.....	71
A.19	Semilongitudes de cada dimensión del gel.....	73
A.20	Distintas posiciones de los geles en el interior del horno.....	74
A.21 a)	Posición A de la sonda de presión, trabajando con el gel en posición horizontal.....	75
b)	Posición B de la sonda de presión, trabajando con el gel en posición horizontal.....	75
c)	Posición de la sonda de presión, trabajando con el gel en posición vertical...	75
A.22	Posición de los geles en el interior el cocedero.....	77
A.23	Posición de los geles en el interior del túnel.....	78
B.1 a)	Efecto de la temperatura sobre el tiempo de tratamiento ($T_3 > T_2 > T_1$).....	91
b)	Variación del tiempo de reducción decimal con la temperatura ($T_2 > T_1$).....	91

c) Relación entre la termorresistencia y el tiempo de reducción decimal.....	91
B.2 Potenciales vías de transmisión de <i>Listeria Monocytogenes</i> en humanos, vía Vegetales.....	94
B.3 Pardeamiento enzimático, debido a la PPO, en tallos de borraja mal envasados.....	95
C.1 Pasos a seguir en una simulación con COMSOL Multiphysics.....	108
C.2 Detalle de la geometría de la esfera.....	111
C.3 Detalle de la calidad del mallado para el gel.....	114
C.4 Diagrama de superficie para un ejemplo de calentamiento del gel.....	115
C.5 Comparativa de temperaturas reales y simuladas para un ejemplo de calentamiento del gel.....	127
C.6 Comparativa optimizada de temperaturas reales y simuladas para un ejemplo de calentamiento del gel (tomando como base el ejemplo de la Fig.C.5).....	129
C.7 Comparativa de temperaturas real y simulada para un ejemplo de calentamiento de la esfera.....	132
C.8 Comparativa optimizada de temperaturas real y simulada para un ejemplo de calentamiento de la esfera (tomando como base el ejemplo de la Fig.C.7).....	133
D.1 Actividad de PPO en función de la concentración de sustrato y de la acidez del medio.....	153
D.2 Ajuste multiparamétrico realizado para caracterizar D_{80} y Z_{80} para la PPO a pH = 6 (Réplica 1).....	154
D.3 Lavadora industrial de vegetales.....	157
D.4 Envasadora al vacío.....	158
D.5 Detalle de los procesos de calentamiento y enfriamiento llevado a cabo en el Producto.....	158
D.6 Detalle de los envases de acelga.....	159
D.7 Evolución temporal de la temperatura en las pencas de acelga (Tratamiento I, Muestra 1, con carga).....	160
D.8 Evolución temporal de la temperatura en las pencas de acelga (Tratamiento I, Muestra 2, sin carga).....	161
D.9 Comparativa de temperaturas reales y simuladas en las pencas de acelga (Tratamiento I, Muestra 1, con carga).....	164
D.10 Comparativa de temperaturas reales y simuladas en las pencas de acelga (Tratamiento I, Muestra 2, sin carga).....	165
D.11 Evolución temporal de la temperatura y de la población de <i>Listeria</i> para un tratamiento térmico recomendado (Muestra 1, sin carga).....	166
D.12 Evolución de la actividad de PPO en un envase de acelgas durante un tratamiento térmico recomendado (Muestra 1, sin carga).....	167
D.13 Tiempos de tratamiento recomendados y porcentaje final de actividad remanente de PPO tras los mismos.....	168

Índice de tablas

2.1	Ciclos de tratamiento térmico.....	16
3.1	Resultados obtenidos en el horno, trabajando con la esfera.....	19
3.2	Resultados obtenidos en el cocedero, trabajando con la esfera.....	20
3.3	Resultados obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con la esfera.....	22
3.4	Resultados obtenidos en el horno, trabajando con los geles.....	24
3.5	Resultados obtenidos en el cocedero, trabajando con los geles.....	25
3.6	Resultados obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con los geles.....	27
3.7	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el horno, trabajando con la esfera y con un modelo de frontera convectiva.....	28
3.8	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el cocedero, trabajando con la esfera y con un modelo de frontera convectiva.....	29
3.9	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con la esfera y con un modelo de frontera convectiva	30
3.10	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el horno, trabajando con los geles.....	32
3.11	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el cocedero, trabajando con los geles.....	33
3.12	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con los geles.....	33
3.13	Ciclos de tratamiento térmico propuestos.....	37
A.1	Intervalos de tiempo para los registros obtenidos en el horno, trabajando con la esfera.....	68
A.2	Dimensiones de los geles utilizados en el horno.....	75
A.3	Posiciones de las sondas durante los experimentos realizados en el horno.....	75
A.4	Dimensiones de los geles utilizados en el cocedero.....	76
A.5	Posiciones de las sondas durante los experimentos realizados en el cocedero...	77
A.6	Dimensiones de los geles utilizados en el túnel de enfriamiento.....	78
A.7	Posiciones de las sondas durante los experimentos realizados en el túnel de enfriamiento.....	79
A.8	Resultados obtenidos en el horno, trabajando con la esfera.....	80
A.9	Resultados obtenidos en el cocedero, trabajando con la esfera.....	81
A.10	Resultados obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con la esfera.....	82

A.11	Resultados obtenidos en el baño de hielo, trabajando con la esfera.....	82
A.12	Resultados obtenidos en el horno, trabajando con los geles.....	83
A.13	Resultados obtenidos en el cocedero, trabajando con los geles.....	84
A.14	Resultados obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con los geles.....	84
C.1	Cálculos para la elección de malla en la simulación con la esfera.....	113
C.2	Cálculos para la elección de malla en la simulación con los geles.....	114
C.3	Posiciones de las sondas (referenciadas a un octante) durante los experimentos en el horno.....	122
C.4	Posiciones de las sondas (referenciadas a un octante) durante los experimentos en el cocedero.....	122
C.5	Posiciones de las sondas (referenciadas a un octante) durante los experimentos en el túnel de enfriamiento.....	122
C.6	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el horno, trabajando con los geles.....	135
C.7	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el cocedero, trabajando con los geles.....	136
C.8	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con los geles.....	136
C.9	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el horno, trabajando con la esfera y con un modelo de frontera convectiva.....	137
C.10	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el horno, trabajando con la esfera y con un modelo de T^a superficial fija.....	137
C.11	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el cocedero, trabajando con la esfera y con un modelo de frontera convectiva.....	138
C.12	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el cocedero, trabajando con la esfera y con un modelo de T^a superficial fija.....	138
C.13	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el túnel de enfriamiento, trabajando con la esfera y con un modelo de frontera convectiva.....	139
C.14	Resultados de la optimización de coeficientes obtenidos en el baño de hielo, trabajando con la esfera y con un modelo de frontera convectiva.....	139
D.1	Valores de actividad para la PPO a pH = 5 para el estudio de la cinética Michaeliana.....	152
D.2	Valores de actividad para la PPO a pH = 6 y pH = 7 para el estudio de la cinética michaeliana.....	152
D.3	Valores experimentales de la constante de Michaelis-Menten y de la $v_{máxima}$ de reacción.....	153
D.4	Valores de actividad para la PPO, a pH = 6, con una rampa lineal de T^a (Réplica 1).....	154
D.5	Valores de termorresistencia y tiempo de reducción decimal para la PPO en acelgas.....	155
D.6	Ciclos de tratamiento térmico.....	158
D.7	Dimensiones de los envases sometidos a tratamiento térmico.....	159
D.8	Posición de las sondas en los envases durante los ciclos de tratamiento térmico.....	159
D.9	Actividad de la PPO en pencas de acelga fresca, antes del tratamiento térmico..	160
D.10	Temperaturas máximas y mínimas alcanzadas por las pencas de acelga.....	161
D.11	Actividad de la PPO en pencas de acelgas procesadas y porcentaje remanente..	162
D.12	Posiciones de las sondas (referenciadas a un octante) durante los tratamientos térmicos.....	163
D.13	Temperaturas iniciales de los envases de acelga.....	164

D.14 Valores remanentes de PPO y Listeria después de los tratamientos térmicos.....	165
D.15 Ciclos de tratamiento térmico recomendados.....	167

